



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

POLIMER KOMPOZITOK FORGÁCSOLÁSÁNAK TRIBOLÓGIÁJA

Doktori (PhD) értekezés

Sarankó Ádám

Gödöllő

2022

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE, Műszaki Intézet

Témavezető(k): Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE, Műszaki Intézet

Dr. Keresztes Róbert Zsolt
egyetemi docens, PhD
MATE, Műszaki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	6
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége	6
1.2. Célkitűzések	7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1. Polimerek és polimer kompozitok jellemzői	8
2.1.1. Műanyagok definíciója.....	8
2.1.2. Polimerek általános jellemzői	8
2.1.3. Polimer kompozitok jellemzői	9
2.2. Polimerek megmunkálásának sajátosságai.....	11
2.2.1. Polimerek megmunkálására alkalmas technológiák.....	11
2.2.2. Szerszámanyagok	13
2.3. A rezgés jelensége esztergálás során	14
2.4. Forgácsoló erők mérése esztergagépen.....	16
2.4.1. Induktív útdóval történő forgácsoló erőmérés	16
2.4.2. Nyúlásmérő bélyegekkel történő forgácsoló erőmérés	17
2.4.3. Általánosított módszer leírások, példaszzerű bemutatásokkal	19
2.5. Fontos tribológiai fogalmak.....	23
2.5.1. Felületek	23
2.5.2. Súrlódás	25
2.5.3. Tribológiai modellvizsgálatok.....	27
2.5.4. Pin-on-disc típusú tribológiai kisminta modellvizsgálati rendszer	29
2.5.5. Tribológiai vizsgálatok a gyakorlatban	29
2.6. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	35
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	37
3.1. Esztergálási vizsgálatok	37
3.1.1. Esztergálási vizsgálatok polimer alapanyagai	37
3.1.2. Az esztergálási vizsgálatok próbatestei	37
3.1.3. Szerszámgép és szerszámok	38
3.1.4. Erőmérés módszere	40
3.1.5. Rezgésmérés módszere.....	42
3.1.6. Felületi érdesség mérési módszere	44
3.2. A kontakt zóna mérési módszere	46

3.3. Tribológiai vizsgálatok	48
3.3.1. Vibrációs egység bemutatása	48
3.3.2. Tribológiai vizsgálatok próbatestei és módszere.....	49
3.3.3. pv érték meghatározása	51
3.3.4. Függvényillesztés és a regressziós vizsgálatok módszere.....	53
4. EREDMÉNYEK.....	54
4.1. Az erőmérés eredményei	54
4.1.1. PA 6 E átlagos főforgácsoló erői.....	55
4.1.2. PA 66 GF30 átlagos főforgácsoló erői	56
4.1.3. PA 6G-H ELS átlagos főforgácsoló erői.....	58
4.2. A rezgés- és a felületi érdességmérés eredményei	59
4.3. A kontakt zóna felületének mérési eredményei	69
4.3.1. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 6 E esetén	71
4.3.2. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 66GF30 esetén.....	72
4.3.3. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 6 G-H ELS esetén	73
4.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei	74
4.4.1. A függvényillesztés eredményei.....	76
4.5. A regressziós vizsgálatok eredményei	79
4.6. Új tudományos eredmények	81
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	85
6. ÖSSZEFOGLALÁS	86
7. SUMMARY.....	87
8. MELLÉKLETEK	88
M1: Irodalomjegyzék	88
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk	94
M3: Próbatestek anyagainak adatlapjai	96
M4: Esztergálási vizsgálatok próbatestjeinek műszaki rajza	101
M5: Főforgácsoló erő diagramjai	102
M6: Rezgésmérés eredményei diagram formájában	104
M7: Felületi érdesség mérési jegyzőkönyvek	108
M8: Mikroszkóppal készített képek feldolgozása (képernyőképek)	116
M9: Súrlódási erő diagramok	129
M10: Együtthatók ábrázolása a pv függvényében	133
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	136

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések:

μ	súrlódási tényező	[-]
a	fogásmélység	[mm]
A	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
A_t	tribológiai kontakt zóna területe	[mm ²]
B	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
C	súrlódási erőt leíró függvény együtthatója	[-]
d	munkadarab átmérője	[mm]
f	előtolás	[mm/fordulat]
$F_{\text{dinamikus}}$	rezgésből adódó dinamikus alternáló erő	[N]
F_f	főforgácsoló erő	[N]
F_N	normál irányú erő	[N]
F_s	súrlódási erő	[N]
F_{statikus}	statikus tömegből és önsúlyból adódó statikus erő	[N]
F_{sx}	súrlódási erő x irányú komponense	[N]
F_{sy}	súrlódási erő y irányú komponense	[N]
l	munkadarab kilógása tokmányból	[mm]
n	fordulatszám	[1/perc]
p_v	felületi nyomás és súrlódási sebesség szorzata	[MPa·m/s]
R^2	determinációs együttható	[-]
R_a	átlagos felületi érdesség	[μm]
s	súrlódási úthossz	[m]
T	munkadarab palástján mért hőmérséklet	[°C]
v_c	forgácsoló sebesség	[m/perc]
v_r	rezgéssebesség	[mm/s]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem ezen fejezetében a téma időszerűségét, jelentőségét, valamint a célkitűzéseimet mutatom be.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

A műszaki műanyagok területén különösen gyors műszaki fejlődés figyelhető meg. Jelentős helyet foglalnak el a különböző adalékolt polimer kompozitok. Korábban a haditechnikai igények kielégítésére szolgáltak, ma már azonban mindenki találkozhat kompozit eszközökkel például az autóiparban és a mezőgazdaság területén is. Ezen szerkezeti anyagok két fő alkotója a szívós mátrix és a nagy szilárdságú erősítőanyag, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van.

A gépészmérnöki gyakorlatban egyre szélesebb körben alkalmaznak kompozit gépelemeket számos előnyös tulajdonságuk miatt. Ezeket a gépelemeket leggyakrabban fröccsöntéssel vagy valamely forgácsolási eljárással állítják elő. A fröccsöntési technológiát általában nagy darabszám, tömeggyártás esetén alkalmazzák, míg az egyedi, kisebb és közepes darabszámú gyártásnál a forgácsoló eljárásokat részesítik előnyben. Az additív gyártástechnológiák egyre szélesebb körben terjednek, azonban az e technológiákkal előállított gépelemek tribomechanikai tulajdonságai még nem közelítik meg a forgácsolással előállított gépelemekét.

Az egyik leggyakrabban alkalmazott forgácsolási eljárás az esztergálás, ahol egyélű, általában álló szerszámmal történik a megmunkálás. A műszaki polimerek és kompozitjaik esztergálása esetén számos probléma merülhet fel. Ezek közül az egyik a folyóforgács kialakulása, mely balesetveszélyes és a forgácsoló szerszám meghibásodását, esetleg teljes tönkremenetelét, törését okozhatja selejtgépjártás mellett. Ezért fontos cél olyan forgácsolási paraméterek biztosítása, mely esetén elemi vagy átmeneti (könnyen törő) forgács alakul ki.

Fontos ismerni a forgácsolás során jelentkező főforgácsoló erő nagyságát is. Ennek ismeretében a forgácsoló szerszám terhelése egyenletesebbé tehető, valamint a helyes forgácsolási paraméterek megadása esetén a forgácsolt anyagban a visszamaradó feszültség minimálisra csökkenthető.

A beállított paraméterek hatást gyakorolnak a forgácsolás során keletkező hőre is. Helyes technológiai beállítások során a forgácsleválasztási rendszer jellemzői – erőhatások, súrlódás, hőkeletkezés - nem okozhatnak a kompozit anyagban jelentős változásokat, károsodásokat, mivel ezzel megváltozhat a kompozit anyag tulajdonsága.

A forgácsolás - mint tribológiai folyamat a szerszám és munkadarab között - befolyásolt a keletkező súrlódási és nyírási munkából disszipálódott hő által, mely jelentős hatást fejthet ki a megmunkált felület minőségére. Az érdekesség, a mikrorepedések, a hordozó felület nagysága, a tényleges felületi hordképesség, az elérhető méretpontosság, mely a forgácsolási eljárások igen nagy előnye, közvetlenül befolyásolt. A leváló forgács típusára a szerszám homlokfelületén ébredő súrlódás is hat, melyet tovább bonyolít a technológiai folyamatot jellemző rezgő hatás a szerszámgép-munkadarab kapcsolatban.

Ez az összetett hatás polimerek esetén kevésbé ismert. Ennek következtében a forgácsolás optimalizálása és a potenciális mérnöki használhatóság, a súrlódó gépelemek méretezésének, tervezésének és gyárthatóságának részletes és pontos tisztázása a közeljövő feladata.

1.2. Célkitűzések

Kutatási célom, hogy meghatározzam az egyélű megmunkálás (esztergálás) tribológiai vonatkozásait, néhány, a mérnöki gyakorlatban gyakran használt natúr és kompozit műszaki műanyag esetén. Disszertációmban a forgács és a megmunkáló szerszám, azaz az esztergalapka homloklapja közötti kölcsönhatásokat vizsgálom.

Ennek eléréséhez a következő célfeladatokat tűzöm ki:

- forgácsolási vizsgálatok elvégzése extrudált poliamid 6 (PA 6 E) alappolimeren, illetve kétfajta kompozitján, eltérő paraméterek megadásával. Mérem a szerszámra ható főforgácsoló- és előtoló erőt. A mért értékekből látható lesz, hogy különböző műszaki műanyag kompozitok esztergálása esetén a forgácsolási paramétereket változtatva, milyen erők hatnak a szerszámra. Megvizsgálom továbbá, hogy anyagonként a paraméterek változtatásával hogyan változik a főforgácsoló erő,
- kiegészítő esztergálási vizsgálatokat végzek, mellyel meghatározom a leváló forgács és az esztergalapka homloklapja közötti tribológiai kontakt zónát. Megállapítom, hogy a zóna területének nagysága mely paraméterektől, hogyan függ,
- kisméretű próbatesteken egyszerű tribológiai vizsgálatokat végzek, melyeknél a vizsgálatok bemeneti paramétereit a forgácsolási vizsgálataim kimeneti paramétereire alapján állítom be,
- A tribológiai vizsgálatok eredményeit elemzem, majd matematikai statisztikai módszerrel a súrlódási erő változására vonatkozó összefüggést írok fel

A kutatási feladat során, egy olyan arányszám meghatározása is célom, melynek szignifikáns szerepe van mind a megmunkálás, mind a tribológia szempontjából, illetve amelynek függvényében megállapítást teszek a súrlódási erők változására.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Értekezésem e fejezetében a hazai és nemzetközi szakirodalom segítségével bemutatom a polimerek és polimer kompozitok jellemzőit, ezen anyagok megmunkálási sajátosságait, esztergálás során a főforgácsoló erő mérési módszereit és a bemeneti paraméterek hatását. Bemutatom továbbá a tribológiai kisminta (kisméretű minta) modellvizsgálatokat, azon belül részletesen ismertetem a pin-on-disc típusú tribológiai vizsgálatot. Az így szerzett információk alapján sejthető, hogy kutatásom új tudományos eredményeket rejt magában.

2.1. Polimerek és polimer kompozitok jellemzői

Ebben a fejezetben ismertetem, hogy mit nevezünk polimernek / műanyagnak. Bemutatom, hogy mik a polimerek általános jellemzői, miért használjuk őket egyre elterjedtebben a műszaki gyakorlatban. Ismertetem a polimer kompozitok fajtáit és tulajdonságait.

2.1.1. Műanyagok definíciója

A műanyagok definíciója különböző irodalmakban eltérő, sokféle megfogalmazásban találok vele. Mindegyik definíció tartalmazza azonban a következőket: a műanyagok szerves eredetű makromolekuláris anyagok, melyek a természetben nem találhatók meg, azonban mesterségesen előállíthatók, műszaki eljárásokkal feldolgozhatók. Ezek az anyagok óriásmolekulákból állnak, melyeket szintetikus úton vagy a természetben megtalálható óriásmolekulák kémiai átalakításával állítanak elő (Pék, 2010; Kalácska, 2007).

A polimer kifejezés nem egyenlő a műanyag kifejezéssel. Miskolczi (2012) szerint polimerek esetén a jellemző molekulatömeg tartomány tágabb, mint a műanyagoké. A műanyagok az alappolimeren kívül tartalmaznak még egyéb adalékanyagokat is, melyekkel tulajdonságaik módosíthatók. Mivel a műanyaggyártásnál alapvetően használnak bizonyos adalékokat, így ez a két kifejezés gyakran összemosódik. A továbbiakban nem teszek különbséget a két megfogalmazás között, hiszen az adalék nélküli alappolimereket jellemzően nem használják műszaki célokra, a szakirodalom is gyakran egyenlőként kezeli a két kifejezést, valamint az angol fordítása a műanyag szónak a polimer.

Sokak, főleg a nem műszaki emberek, még a mai napig úgy tekintenek a műanyagokra, mint valamiféle helyettesítő anyagokra. A magyar „műanyag” szó első része is ezt tükrözi. Ez talán igaz is volt, amikor történelmi és gazdasági okok miatt a gumit akarták helyettesíteni különféle pótló anyagokkal, viszont a műanyagok kedvező tulajdonságainak köszönhetően ebből a szerepből fokozatosan létrejött egy teljes értékű anyag, amely a mindennapi és a műszaki életben egyaránt fontos. Bizonyos műszaki területeken kifejezetten a polimer alapú gépelemeket részesítik előnyben (Pék, 2010; Miskolczi, 2012).

A műanyagok széles családján belül megkülönböztetjük a műszaki műanyagokat. Ezen anyagok tág hőmérséklet-határok közt is kiváló mechanikai, tribológiai, vegyszerállósági tulajdonságokkal rendelkeznek, így alkalmasak lehetnek elsődleges célú gépelemek gyártására. (Kalácska, 2007).

2.1.2. Polimerek általános jellemzői

Ebben a fejezetben a műanyagok gyakorlati jelentőségét kívánom hangsúlyozni. Talán nem is lehet ezt célszerűbben tenni, mint úgy, hogy összehasonlítom őket a műszaki életben messzemenően leggyakrabban alkalmazott anyagokkal, a fémekkel. Fontosnak tartom

leszögezni, hogy a polimerek nem pótanyagok, hanem teljes értékű műszaki anyagok. Ennek ellenére nem helyettesíthető minden esetben a fém vagy egyéb korábban használt műszaki felhasználású anyag polimerrel. Vannak azonban bizonyos körülmények, amikor kifejezetten előnyösebb egy műanyag gépelem, mint például egy fémből készült alkatrész. Ennek okai a következők (Kalácska, 2007):

- a szilárdság/sűrűség viszonyuk mintegy 1/7-ed része a fémekhez viszonyítva,
- kiváló korrózióálló és vegyszerálló képesség,
- hő- és villamos áram szigetelőképeség jó, más megfogalmazásban rossz vezetők,
- adalékolhatók különféle erősítő anyagokkal, melyekkel az előnyös tulajdonságaik növelhetők mondhatni tetszés szerint,
- esztétikai szempontból előnyös, hogy tetszés szerint színezhetők, másodlagos felületkezelés nem szükséges,
- megmunkálásuk jelentősen egyszerűbb, mint a fémeké,
- fröccsöntéssel vagy extrudálással a késztermékek gyorsan előállíthatók,
- hőállóságuk csekély,
- kúszásra hajlamosak,
- gyúlékonyak,
- hőmérséklet emelkedés hatására a mechanikai tulajdonságok drasztikusan romlanak.

Mint látható, a felsorolás tartalmaz előnyöket és hátrányokat egyaránt. Az, hogy egy tulajdonság előny vagy hátrány, azt mindig a felhasználás jellege határozza meg.

Fontosnak tartom továbbá megjegyezni, hogy ezek a tulajdonságok általában igazak a műszaki polimerekre, azonban nem minden anyagra. Például, ha adalékolt kompozitról beszélünk, a szigetelőképeség függ az adalék szigetelőképeségétől, illetve a mennyiségétől. Másik példa, hogy a nedvszívó képessége bizonyos polimereknek igen magas. Nedves állapotban a vezetőképesség nő stb.

2.1.3. Polimer kompozitok jellemzői

A polimer kompozit olyan anyag, amelynek legalább két fázisa van, folytonos fázisként polimerként és diszpergált fázisként töltőanyagként vagy szálként. A folytonos fázis (mátrix) felelős a térfogat kitöltéséért és a terhek átviteléért a diszpergált fázisba. A diszpergált fázis felelős a kompozit egy vagy több tulajdonságának javításáért.

A polimer kompozitokat kiemelkedő mechanikai tulajdonságaik miatt széles körben használják speciális mérnöki anyagként a repülőgépipar, az autóipar, az építőmérnöki munkák területén stb. A térfogatfrakció és az erősítő anyag orientációja dönt a kompozitok tulajdonságairól, például a merevségről, szilárdságról, hővezető képességről és egyéb tulajdonságokról. Új polimerek szintetizálása helyett a kompozitok tulajdonságai is felvehetik a versenyt a fémekkel és egyéb nemfémes anyagokkal egyaránt.

A kompozitokat számos ipari követelmény kielégítésére fejlesztették ki, mint például az egyszerűbb feldolgozás és a tulajdonságaik szélesítése, az egyes komponensek típusának, relatív mennyiségének vagy morfológiájának változtatásával. A kompozitok többsége a mechanikai tulajdonságok, például a merevség és szilárdság fokozását célozza meg, de más tulajdonságok is módosíthatók, például sűrűség, termikus tulajdonságok stb.

Polimer kompozitok esetén az egyik legfontosabb paraméter a folytonos fázis (polimer) és a szakaszos fázis (adalék) közötti interfész hatékony szabályozása. A kompozit anyagok legnagyobb előnye, hogy lehetőséget nyújtanak tulajdonságaik testre szabására a részecskék méretének (különösen, ha szálas formában vannak) és orientációjuknak változtatásával (M. N. Subramanian, 2017, S. L. Evans és P. J. Gregson, 1998).

A polimer keverékek és kompozitok előnyei az alábbiakban foglalhatók össze:

- alacsony ár,
- könnyű, ezáltal könnyen szállíthatók,
- könnyen gyárthatók sajtolással, fröccsöntéssel, préssel, formázással stb.,
- tartósság a környezeti degradációval szemben, mint például korrózió, rozsdásodás
- nincsenek nagy hőfeszültségek, mint a fémek esetében.

Adalék anyag szinte bármi lehet. A legtöbb műszaki polimer tartalmaz valamilyen adalékot, hogy javítsa az alap polimer tulajdonságait egy speciális alkalmazásban. Ennek eredményeként a kereskedelmi forgalomban lévő műanyagok nagyon eltérhetnek az alappolimerétől. Néhány tipikus adalékanyag (lásd mindegyik tárgyalását Crawford (1992)):

- antisztatikus szerek,
- kapcsolószerkezetek,
- kenőanyagok,
- égésgátló,
- lágyítók,
- pigmentek,
- stabilizátorok,
- erősítések (alumínium-oxid, szálak stb.).

Az üvegszál a leggyakoribb adalékanyag a polimer kompozitok területén. Kutatásom során felhasznált alapanyagom egyike szintén üvegszállal erősített. Az üvegszál erősítésű polimer kompozitokat különféle gyártási technológiával állítják elő, és széles körben használják különféle alkalmazásokhoz. Kezdetben az ókori egyiptomiak hő lágyított üvegből készült üvegszálakból készítettek edényeket. Az üvegszálakat először az 1930-as években gyártották magas hőmérsékleten üzemelő elektromos alkalmazásokra. Napjainkban elektronikában, repülésben és gépjárművekben stb. használják. Formájuk lehet, aprított szál, fonál, szövetek és összeszőtt szövet formájában. Az üvegszálak mindegyik típusának egyedi tulajdonságai vannak, és különféle alkalmazásokhoz használják őket (T.P. Sathishkumar, 2014).

A szálerősítésű kompozit mechanikai viselkedése alapvetően a szál szilárdságától és modulusától, a kémiai stabilitástól, a mátrix szilárdságától és a szál/mátrix közötti kötéstől függ. Mindezek fontos tényezők a terhelésátadás folyamatában a kompozit anyagon belül. A szálak megfelelő összetételének és orientációjának függvényében a GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) kompozitok kívánt tulajdonságai és funkcionális jellemzői megegyeznek az acéléval, nagyobb merevséggel rendelkeznek, mint az alumínium, és fajsúlyuk az acél egynegyede (F.A. Lopez et al., 2012, S. Erden et al., 2010, G. H. Awan et al., 2009).

Az üvegszálás kompozitokkal kapcsolatban T. Sathishkumar et al. (2014) a következőket állapította meg:

- a hajlító- és szakító szilárdság nő,

- minél nagyobb az üvegszál aránya az anyagban, a kompozit elasztikus alakváltozása annál jobban csökken.
- nő a kompozit rugalmassági modulusa,
- csillapítási tulajdonságok javulnak,
- a vízfelvétel rontja a mechanikai tulajdonságokat üvegszálás kompozit esetén,
- súrlódás esetén a kopás mértéke csökken az adalékolás arányának növekedésével,
- különféle vegyi anyagokkal tovább javíthatók a kompozit mechanikai, termikus és tribológiai tulajdonságai.

2.2. Polimerek megmunkálásának sajátosságai

2.2.1. Polimerek megmunkálására alkalmas technológiák

A polimerek megmunkálásához általában nincs szükség speciális szerszámgépekre. A fémek megmunkálásához használt berendezések használhatók. Az eltérés a beállított paraméterekben, illetve a megmunkáló szerszám anyagában, geometriájában van. A legnagyobb kihívást általában a szálerősített anyagok jelentik, hiszen ezek a szálak (általában üveg-, szén-, és aramidszálak) nagyon kemények a polimer mátrix anyagához képest és a hagyományos gyorsacél (HSS, azaz High Speed Steel) szerszámokat nagymértékben koptatják. Ezekhez az anyagokhoz nem ajánlott a gyorsacél szerszámok használata, amely másrészt kiválóan alkalmazható adalékolatlan polimerekhez. A polimereket a szokásos hagyományos megmunkálási eljárásokkal forgácsolják, melyek a következők:

- esztergálás,
- marás (M. Ucar és Y. Wang, 2005, J. P. Davim és P. Reis, 2004)
- fúrás (G. DiPaolo et al., 1996, S. Jian és D. C. H. Yang, 1993),
- abrazív forgácsolás és köszörülés (M. Ramulu et al., 2003).

Természetesen, csak úgy, mint a fémek esetében, a polimereket is lehet egyéb módon megmunkálni, mint például:

- abrazív vízvágással (J. Zeng, 2007, M. Hashish és M. Hilleke, 1998),
- lézerrel (A. A. Cenna és P. Matthew, 2002),
- elektromos kisüléssel megmunkálással (EDM, azaz Electrical Discharge Machining) (C. Sommer és S. Sommer, 2005, P. M. George et al., 2004).

Előbbi technológiákat főként a polimer anyagok darabolására használják, míg utóbbi akár a termékek készre munkálására is alkalmas. Az EDM technológia nehezen megmunkálható fémek, öntvények és polimer kompozitok megmunkálására alkalmas. Fontos követelmény, hogy a megmunkálandó munkadarab elektromos vezető legyen, így általánosságban az adalékmentes polimereket ezzel a technológiával nem lehet megmunkálni.

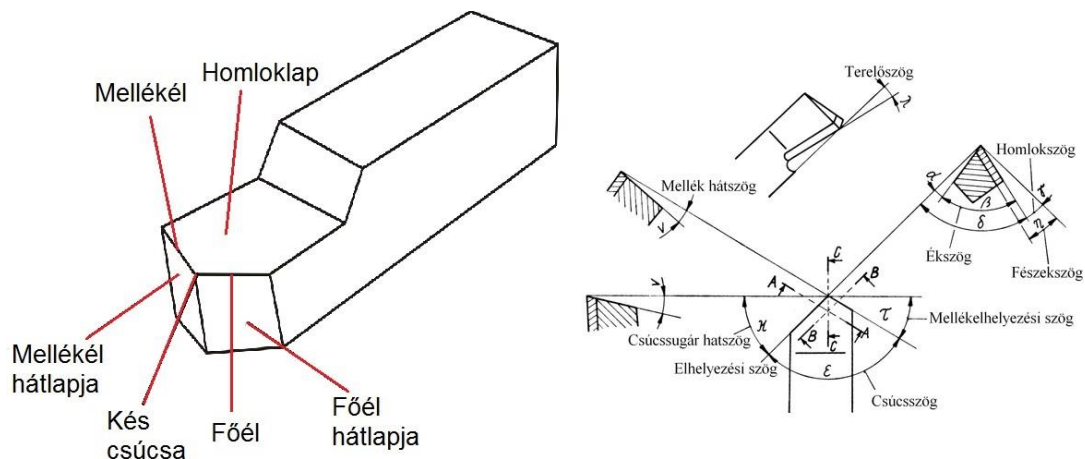
Disszertációmban az esztergálást választottam, mint megmunkálási technológia. Ez az egyik leggyakrabban alkalmazott forgácsoló eljárás. Ebben az esetben a főmozgást a munkadarab végzi, a mellékmozgásokat pedig a szerszám (kivéve hajtott szerszámok esetén). Az esztergákések szögei és oldallapjainak elnevezései láthatók a 2.1. ábra bal és jobb oldalán.

A 2.2. ábra a palástesztergálás folyamatát mutatja. Palástesztergáláskor általában egyélű oldalazó kést használnak. A hengeres munkadarabot a tengelye körül forgatják, miközben egy forgácsolószerszámot a forgástengellyel párhuzamosan előtolnak. Amint a vágószerszám

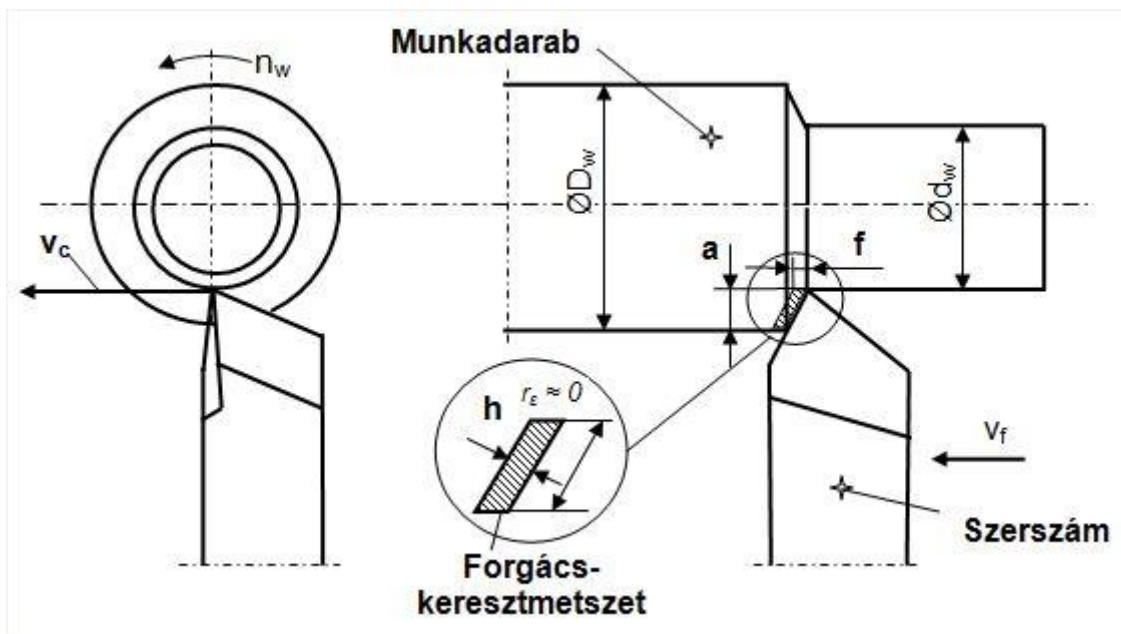
behatol a munkadarabba, új forgásfelület keletkezik egy olyan anyagréteg eltávolításával, amelynek vastagsága megegyezik a szerszám belépési mélységével, azaz a fogásmélységgel.

A szerszám gép az elsődleges mozgást biztosítja a munkadarabnak, általában percnkénti fordulatszámmal, a másodlagos mozgást pedig a forgácsolószerszámnak, általában milliméter/fordulatban. A felületet létrehozó kombinált mozgás ennek a két mozgásnak a vektor addíciója. A legtöbb gyakorlati alkalmazásnál az előtolási mozgás sokkal kisebb, mint az elsődleges mozgás, és a vágási sebességet csak az elsődleges mozgás határozza meg

A szerszámoknak polimer kompozit anyagok esetén különleges követelményei vannak



2.1. ábra Esztergakés geometriája (tudasbazis.sulinet.hu, 2021)



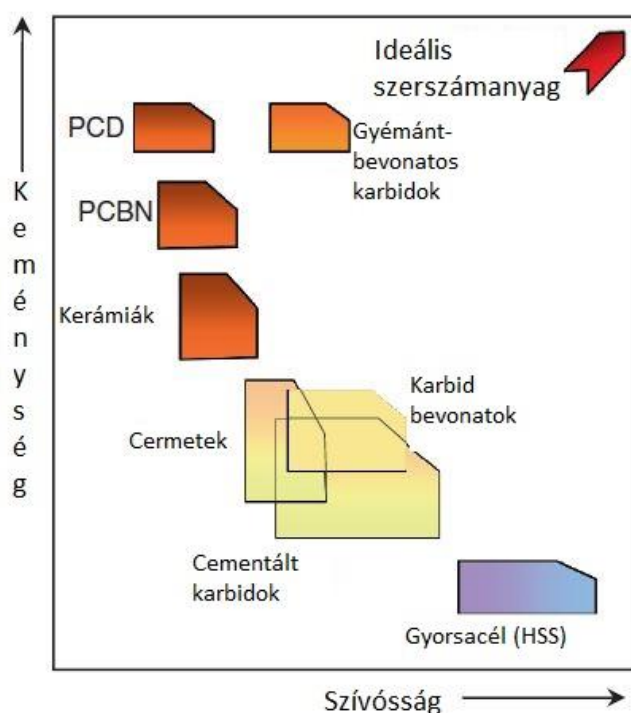
2.2. ábra A palástesztalgálás mozgásviszonyai (regi.tankonyvtar.hu, 2021)

A főélt három meghatározó felület határolja. A homloklap, a mellékél hátlapja és a főél hátlapja. Ezeknek a felületeknek a szárhoz való viszonya meghatározza azokat a szögeket, amelyeket a csúcsrádiusszal együtt használnak szerszámazonosításként. Forgácsolás közben a forgács a homloklapon csúszik, mozgásának irányát a homlokszögek befolyásolják. A generált erők szintén befolyással vannak a kés szögei. Az homlokszög és a hátszög célja, hogy hézagot

biztosítson a vágóél és a munkadarab felülete között. Az terelőszög mélyen befolyásolja a szerszám kopását. Hagyományosan az egyélű vágószerszámokat gyorsacélból (HSS) készítették. A gyorsacél szívóssága lehetővé teszi, az éles vágóél köszörülését, ami elengedhetetlen a szélerősített polimerek megmunkálásakor. Az éles vágóél pozitív élszöggel kombinálva lehetővé teszi a szálak nyírását és így jó felületi érdességet biztosít. A gyorsacél szerszámok azonban a szálak kompozitok megmunkálásakor meglehetősen gyorsan kopnak a szálak nagy koptató képessége miatt, és használatuk általában nem célszerű. Általában forrasztott vagy csavarral rögzített keményfém betétekkel ellátott késszárakat szoktak használni ennek kiküszöbölésére.

2.2.2. Szerszámanyagok

A forgácsoló szerszámanyagok széles választéka áll rendelkezésre a megmunkálási alkalmazásokhoz. Ezeket az anyagokat keménységük, szilárdságuk és szívósságuk alapján általában három fő csoportba sorolják, amint azt a 2.3. ábra mutatja, amely szemlélteti a keménység és a szívósság ellentétes kapcsolatát is.



2.3. ábra Szerszámanyagok csoportosítása (J. Y. Sheikh-Ahmad, 2008)

A három csoport a gyorsacélok (HSS), cementált keményfémek és a kerámia/szuperkemény anyagok. Minden csoportnak megvannak a maga jellegzetes mechanikai és termikus tulajdonságai, amelyek okán alkalmazása bizonyos megmunkálási műveletekhez jobban alkalmas. A keménység azt mutatja, hogy az anyag mennyire kopásálló, a szívósság pedig azt a képességet mutatja, hogy mennyire ellenáll a törésnek nagy és/vagy dinamikus terhelések esetén. A nagyon kemény anyagok szívóssága nagyon gyenge, és fordítva. A szilárdság és a kopásállóság együttes elérését mutatja a 2.3. ábra. Az ideális szerszámanyag, amelyet még nem fedeztek fel, nagy keménységgel és nagy szívóssággal rendelkezik.

A szerszámacélok a legrégebbi szerszámanyagok a három csoportból, és magukban foglalják a HSS-t, valamint a többi ötvözött acélt. Ez a csoport rendelkezik a legnagyobb szívóssággal,

mérsékelt szilárdsággal és alacsony vagy közepes keménységgel (68 HRC-ig), amelyet hőkezelés biztosít. E tulajdonságok miatt az ebbe a csoportba tartozó eszközök könnyen összetett geometriákra és nagyon élesre köszörülhetők. A HSS szerszámokat kopás után is újra lehet élezni, hőkezelt és felhasználni. Ezeknek az anyagoknak a kohászata és feldolgozása évek óta létezik, ezért költségük alacsony a többi szerszámanyaghoz képest. Legnagyobb hátrányuk azonban az, hogy nem képesek magas hőmérsékleten megtartani a keménységüket (ausztenites átalakulási hőmérséklet), és ezért nem alkalmasak nagysebességű megmunkálásra. Alacsony keménysége és mérsékelt szilárdsága miatt gyakorlatilag nem alkalmazhatók koptató anyagok, például üvegszálalás és egyéb részecske-erősítésű polimerek, alumínium-szilícium ötvözetek és öntöttvas megmunkálásához, vagy nagyoló megmunkálásokhoz.

A szerszámanyagok cementált karbidcsoportja főként volfrám-karbidokon (WC) alapszik, mint kemény fázis, de tartalmaz más karbidokat is, mint például a TiC (titán-karbid) és a TaC (tantál-karbid). A szerszámokat a karbidporok és egy fém kötőanyag, például kobalt megfelelő keverékének hidegen sajtolásával állítják elő. Ezután kb. 1350 - 1650 °C közötti hőmérsékleten szinterezik, hogy megolvassák a kötőanyagot és kötést hozzanak létre a kötőanyag fémje és a keményfém szemcsék között. A keményített keményfémek keménységét a keményfém fázis adja, míg a kötőfém biztosítja a szükséges szívósságot. Feldolgozási technikájuk lehetővé teszi, hogy különböző formájúak és méretűek legyenek. Gyémánt vagy CBN (kőbős bór-nitrid) köszörűszerszámokkal viszonylag könnyen köszörülhetők is. Nagy keménységet és nagy szilárdságot biztosítanak, és viszonylag magas hőmérsékleten is megőrzik tulajdonságaikat. Keménységük és hőstabilitásuk tovább javítható, ha kemény kerámiákból készült vékony filmbevonatokat alkalmaznak a vágófelületekre. A cementált keményfémek előállításának technológiája fejlett, amely lehetővé teszi a tömeges és alacsony költségű előállításukat. Mindez alkalmassá teszi a cementált keményfémeket általános felhasználású forgácsoló szerszámokhoz. A rendelkezésre álló keményfém-típusok, szemcseméretük és kötőanyag-tartalom széles skálája megkönnyíti a speciális keményfém-minőségek egyedi alkalmazásokhoz való testre szabását. A cementált karbidok hiányosságai azonban a nem megfelelő keménység a fejlett és erősen koptató mérnöki anyagok megmunkálásához, valamint a vegyi kopás iránti hajlam magas vágási hőmérséklet esetén.

A szuperkemény szerszámanyagokat főleg olyan alkalmazásokhoz fejlesztették ki, ahol a hosszú szerszámélettartammal és a magas termelékenységgel szemben támasztott követelmények jelentik a legnagyobb gondot. Az egykristályos gyémánt kivételével ezeket a szerszámanyagokat a kemény fázis szinterezésével is előállítják mikrorészecskék formájában, kötőfázissal vagy nélküle. A kötő fázis, amely lehet kerámia vagy fém, javítja a vágószerszámok szívósságát és gyárthatóságát. A szinterezést rendkívül magas hőmérsékleten és nagy nyomáson hajtják végre, hogy elősegítsék a szerszám anyagának megszilárdulását és kötését. Emiatt nagyon magasak a gyártási költségeik. (J. Y. Sheikh-Ahmad, 2008).

2.3. A rezgés jelensége esztergálás során

Műszaki polimereket számos kutató forgácsolt már korábban. A legtöbb nemzetközi szakirodalomban fellelhető munka a polimerek marására és fűrészesre összpontosít, azonban találhatunk esztergálással foglalkozó szócikkek is.

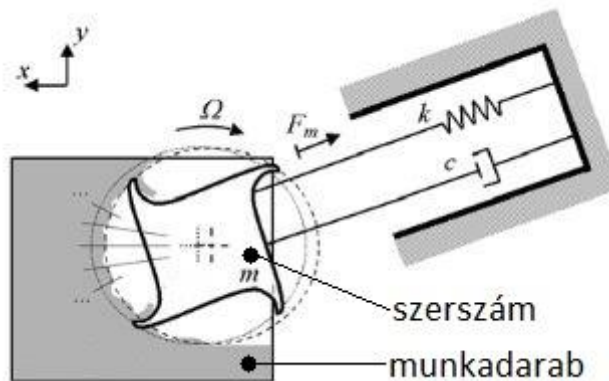
Kevesen foglalkoztak azonban az esztergálás során fellépő rezgésekkel. A rezgések megmunkálás közben általában nem kívánatos jelenségnek számítanak. Okozhatják helytelenül

megválasztott forgácsolási paraméterek, túl nagy munkadarab kilógás megtámasztás nélkül, éleetlen szerszám stb.

A rezgés, mint jelenség, rendkívül negatívan hat a megmunkált felület minőségére. Ennek kiküszöbölésére kétféle megoldást alkalmaztak. Az egyik, amikor ultraszonikus rezgést adtak hozzá a megmunkálás folyamatához. Ezeket a megoldásokat összefoglaló néven VAM-nek (Vibration Assisted Machining) nevezik, míg kifejezetten az ultraszonikus rezgéstámogatással ellátott esztergálás neve UAT (Ultrasonic Assisted Turning) (M. N. Kumar et al., 2014). A másik megoldás, amikor a főorsó fordulatszámát folyamatosan, periodikusan változtatják. Az SSV (Spindle Speed Variation) általában szerszámgépi jellemző. Egyes gyártók úgy készítik el szerszámgepeiket, hogy ez a funkció gyárilag benne van.

Megállapították, hogy az UAT rendkívül hatékony a nagy szilárdságú ötvözetek, mint például titán- és nikkeltötvözetek esetén, továbbá nehezen megmunkálható és törékeny anyagok esztergálásakor (R. Muhammad et al., 2012, S. Patil et al., 2014, N. Ahmed, 2013, X. Zhang et al., 2011, J. C. Outeiros et al., 2013). Megfigyelték az esztergálás során fellépő feszültségek drasztikus csökkenését is. Megállapították, hogy a periodikus relaxáció következtében a feszültségek akár 50%-kal csökkenhetnek. A forgácsolási erők csökkenésének mértékét 40-45%-os értékben állapították meg. E két ok miatt a szerszám élettartama is kitolódik és a felületi minőség is számottevően javult (R. Muhammad et al., 2012, S. Patil et al., 2014, P. Gou és K. F. Ehmann, 2013, H. Jamshidi et al., 2013, A. S. Adnan és S. Subiah, 2010).

Az SSV módszert kifejezetten hosszú, vékony munkadaraboknál, palástesztergálás esetén alkalmazzák. Elve azon alapszik, hogy állandó főorsó-fordulatszám esetén rezonancia keletkezik a munkadarabban és bizonyos esetekben az állandó fordulatszám e rezonancia hatását fordulatonként növeli. A módszer lényege, hogy a főorsó fordulatszámát forgácsolás közben - általában szinuszosan - növelik, majd csökkentik, azaz periodikusan változtatják. Ebben az esetben az alap rezonanciát nem gerjeszti a konstans fordulatszám. A módszer elvét marás esetén a 2.4. ábra szemlélteti.



2.4. ábra Forgácsoló szerszám, mint csillapított dugattyú (I. Bediaga et al., 2008)

Esztergálásnál is a szerszám egy csillapított dugattyúként modellezhető, így az azonos frekvenciájú rezgések gerjesztik a rendszert és a számos fordulat alatt egy poligon keresztmetszet alakul ki, ami nem kívánatos. A módszer hasznosságát számos kutató bizonyította (G. Urbikain, 2016, H. Ma et al., 2017, M. Siddhpura és R. Paurobally, 2012).

2.4. Forgácsoló erők mérése esztergagépen

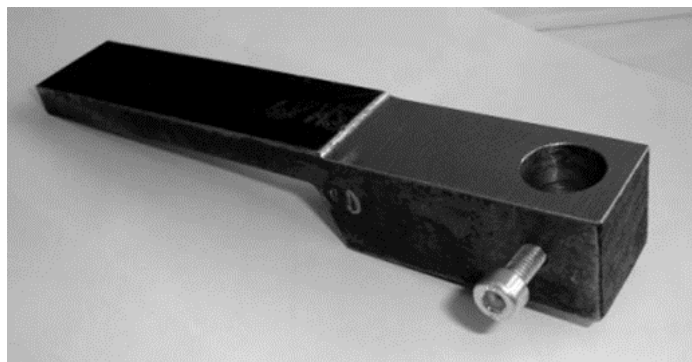
A forgácsoló erő meghatározására szolgáló eljárások közül a számítások többnyire csak egy statikus erőt adnak meg, noha a forgácsoló erő változik. A forgácsoló erőnek az időbeli változását emiatt mérésrel kell meghatározni. Erre vonatkozóan a korábban általánosan használt, hagyományos módszereket (rugós erőmérő, hidraulikus erőmérő, villamos ellenállás változáson, maradó alakváltozáson, vagy teljesítménymérés alapján történő erőmérés) korszerűbb mérési technikák váltották fel (Dömötör, 2013).

A forgácsolási erő mérésének két fő típusát különböztetjük meg:

- Induktív útagó (lehajlás mérés)
- Nyúlásmérő bélyegek (húzott felületi szálak mérése)

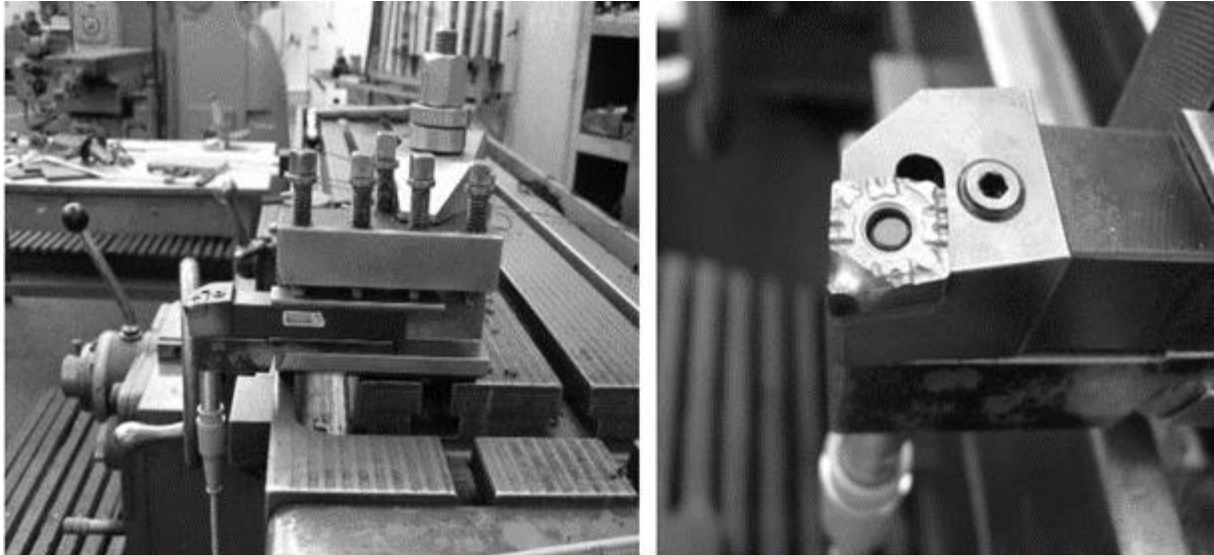
2.4.1. Induktív útagóval történő forgácsoló erőmérés

Az elmozdulással arányos forgácsolóerő méréséhez induktív útagót használtak, melynek befogásához egy befogófejet (2.5. ábra) terveztek.



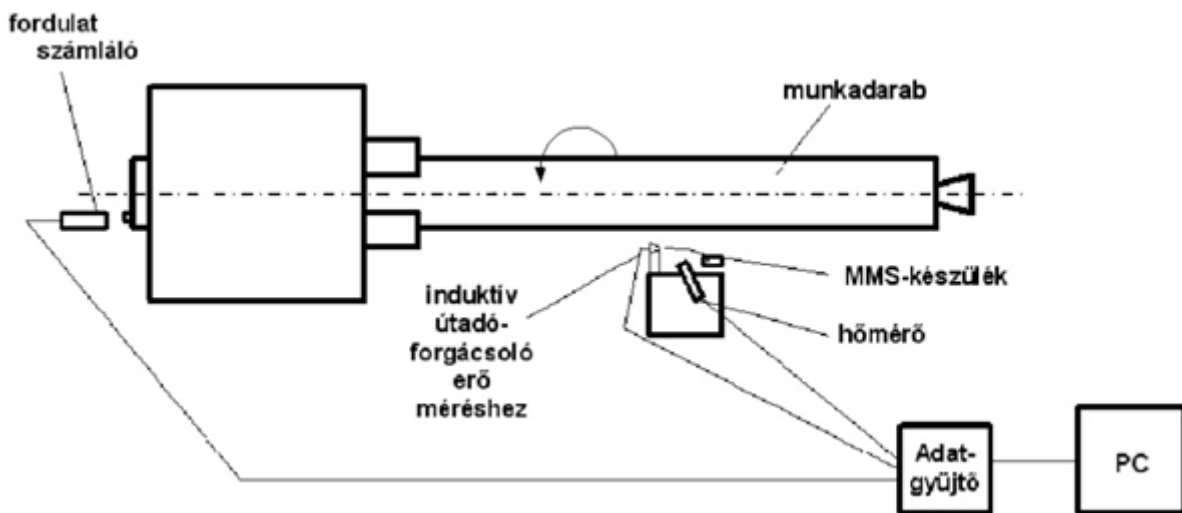
2.5. ábra Induktív útagó befogója (Kári-Horváth, 2009)

Egy marógép asztalára megfelelően rögzítették a késtartót, amelybe már befogták az induktív útagó befogóját is. A lapkára egy hornyot köszörültek (2.6. ábra), hogy a terheléskor a súlyok mindig a csúcshatásvonalába essenek. A súlyokat tartó szár tömegét lemérték, majd a lapkán elkészített hornyba tették. A következő lépésként beállították az induktív útagó felső síkja és a késszár közötti hézagot. Az induktív útagót bekötötték a mérő rendszerbe, majd elkezdték terhelni a rendszert. Az erőmérő karakterisztikájának felvételéhez hitelesített súlyokat alkalmaztak (Kári-Horváth, 2009).



2.6. ábra Induktív útdó megfogása a késtartóba és a megmunkált lapka (Kári-Horváth, 2009)

A mérőkör felépítését a 2.7. ábra mutatja. A szerszámgép késtartójához egy állványt készítették, amelyhez rögzítették az aktivációs elemeket.



2.7. ábra A mérőkör elvi vázlatja (Kári-Horváth, 2009)

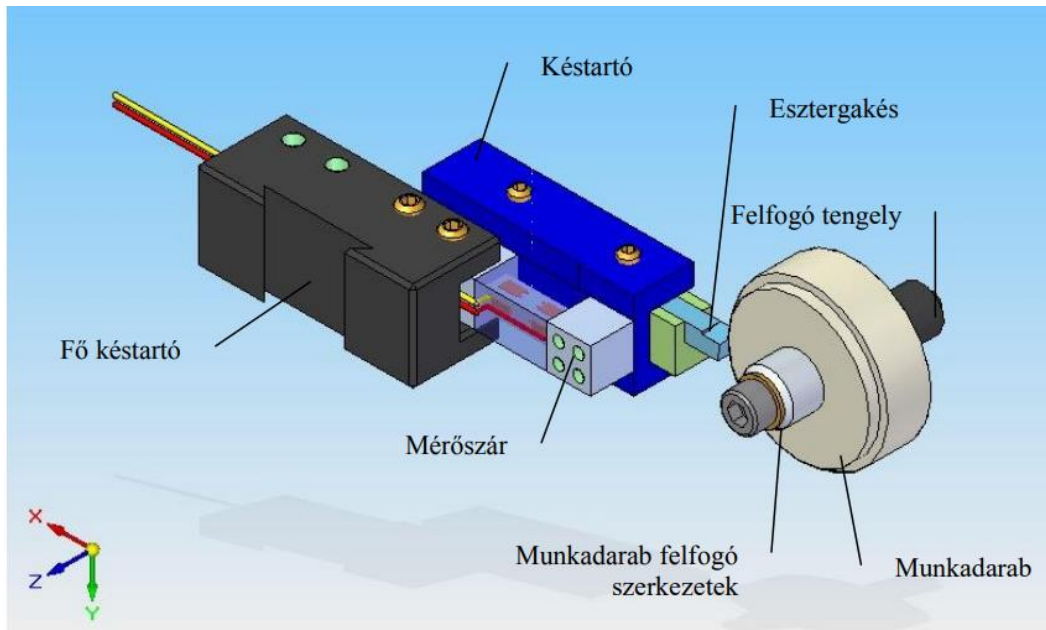
A módszert nem tekinthetjük pontosnak, hiszen a lehajlás nagymértékben tompítja a forgácsoló erő változásait, másrészt csak egy tengely mentén képes mérni ezért az oldalirányú erőket és pld. a csavarást nem veszi figyelembe (Kári-Horváth, 2009).

2.4.2. Nyúlásmérő bélyegekkel történő forgácsoló erőmérés

A forgácsolási erők hatására deformálódó szerszámszárak felületén ébredő húzófeszültségek mérésére, nyúlásmérő bélyegeket helyeznek el ragasztással a felületekre. Ezekkel pontosan és több tengely mentén lehet mérni az alakváltozást és ebből a szerszámra ható erők nagyságát.

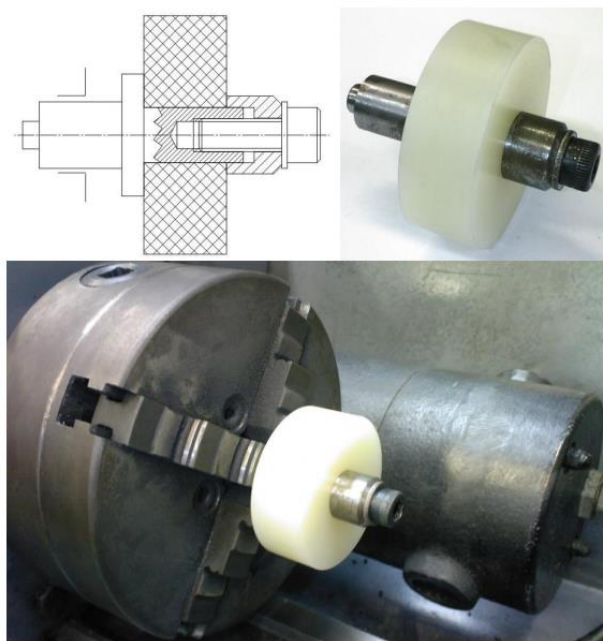
A forgácsoló erők meghatározásához célszerű az aktív erők egyidejű mérését végző rendszert kialakítani. Ezt ún. kétkomponensű erőmérővel lehet megvalósítani.

Az erőméréshez használt késmegfogás felépítését szemlélteti a 2.8. ábra. Az ábra a 3D-s modellt szemlélteti.



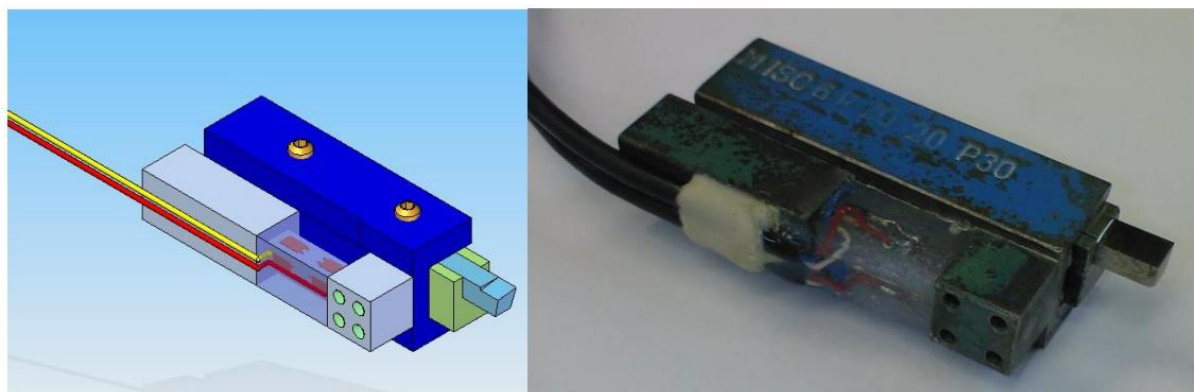
2.8. ábra A mérőrendszer 3D-s ábrája (Dobrocsi, 2011)

A vizsgálatra szánt polimer félkész termékekből először esztergálással el kell készíteni a próbatesteket. A munkadarab közepén egy furatot készítettek. Ezeket egy a furatba illeszkedő kisebb tengelyre rögzítették az ábrán látható módon, majd a tengelyt fogták be a tokmányba, ezáltal biztosítva a kés kifutását (2.9. ábra).



2.9. ábra Felfogatott munkadarab metszeti vázlata és fényképei (Dobrocsi, 2011)

A késtartóba van befogva a nyúlásmérő bélyegekkel ellátott mérőszár (2.10. ábra). A kikönnyített rész van felbélyegezve, ezzel biztosított, hogy a mérőszár a megfelelő helyen hajoljon ki.



2.10. ábra A mérőszár 3D-s modellje (bal) és a megvalósított mérőszár (jobb) (Dobrocsi, 2011)

Ennek a rendszernek az előnye a pontosabb mérés és a szerszám cserélhetősége. A hozzáadott elemek miatt azonban a tényleges vágóél túl messze van a fő szerszámtartótól, ami instabillá teheti a méréseket (Sarankó et al., 2018)

Egy olyan továbbfejlesztett nyúlásmérő bélyeges módszert mutatok be ezek után, melyet a saját kutatásban is használok (lásd 3. fejezet, „Anyag és módszer”).

A forgácsoló, illetve az előtoló erő mérése egy nyúlásmérő bélyegekkel felszerelt váltólapkás eszterga késszár segítségével történik (2.11. ábra). A bélyegek jele egy analóg/digitális mérőjel gyűjtő erősítőbe jut, amely pl. párhuzamos porton át egy a számítógéphez csatlakozik további szoftveres adatfeldolgozásra (Kovács, 2016).

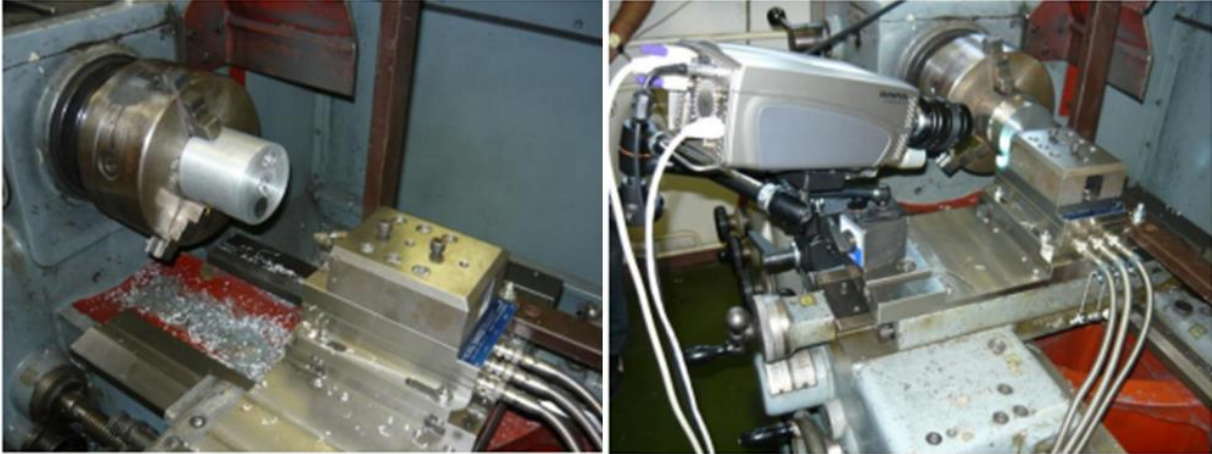


2.11. ábra A nyúlásmérő bélyegekkel ellátott kés a késtartóban elhelyezve (forrás: Dr. Keresztes Róbert)

2.4.3. Általánosított módszer leírások, példaszerű bemutatásokkal

Dömötör (2013) a kísérleti eredmények kiértékeléséhez a mérőrendszerek saját szoftverein kívül - a forgácsoló erő vizsgálatához egy Matlab környezetben írt saját kiértékelő programot, míg - a korrelációs erősségek meghatározásához pedig az Excel szoftver korrelációs szolgáltatását használták

Az egyes feladatok technikai megoldásának pontosabbá tétele, valamint az optikai rálátás biztosítása és a vizsgáló eszközök jobb elhelyezése, kihasználása érdekében a keresztesztergálást választották. A vizsgálatokat egy EU-400/01 típusjelű, nyílt munkaterű esztergagépen végezték (2.12. ábra).



2.12. ábra A mérőrendszer felépítése (Dömötör, 2013)

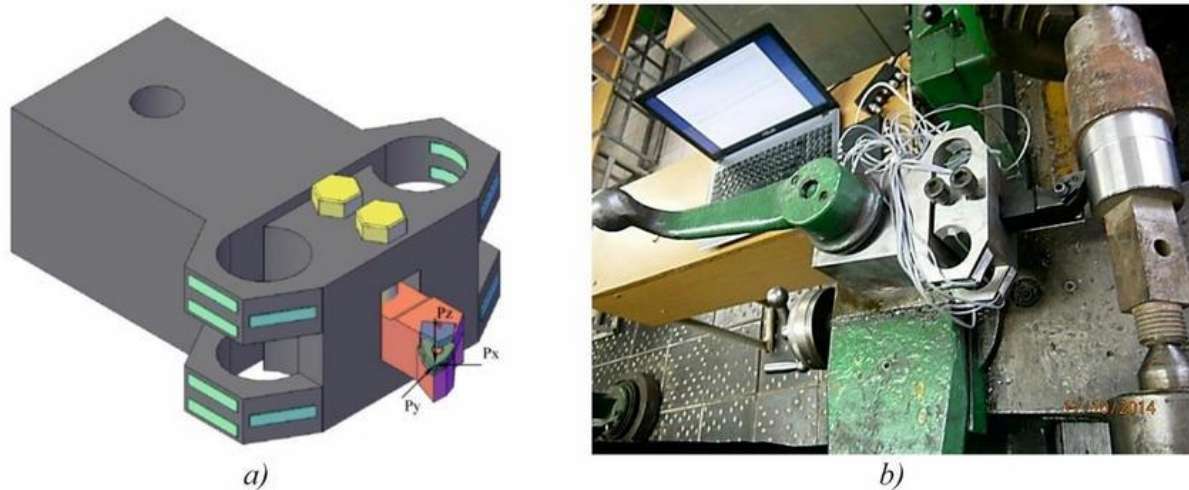
A vizsgált próbatestek anyaga egy hengerből, és egy abba zsugorkötéssel beleerősített, más anyagból készült dugó volt.

A Kistler erőmérő, és a gyorskamera beállításai minden esetben azonosak voltak. A különböző típusú és gyártmányú hőkamerák, valamint az ugyancsak különböző rezgésanalizátorok beállítási paramétereit értelemszerűen az egyes méréseknél adták meg. Az első sorozatban általános képet kaptak a forgácsolási folyamat során keletkező erők időbeli változásáról és az erőfüggvény spektrumáról. A második sorozatban egy nagyteljesítményű rezgés-adatgyűjtővel mértek. A harmadik sorozat során a fő cél egyértelműen az volt, hogy a nagy teljesítményű hőkamerát vonali üzemmódba kapcsolva megállapítsák a forgácsolási hőmérséklet időbeli változását.

A mérés rendkívül pontos és összetett. Hátránya viszont, hogy mind a hőkamera, mind pedig az erőmérő egység rendkívül költséges a korábban említett megoldásokhoz viszonyítva.

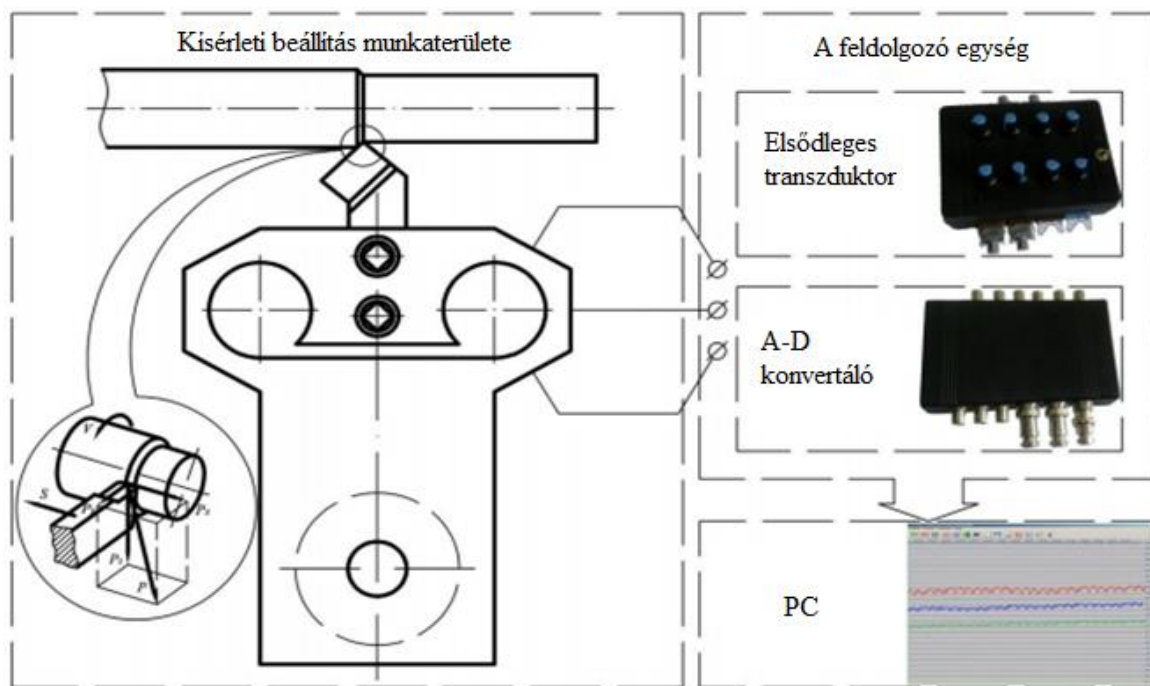
Egy másik, speciálisnak nevezhető erőmérési módszert alkalmazott Zablotskyi és társai. (2017). A kialakítás célja a forgó munkadarab felület megmunkálása során (esztergálás) milyen fizikai és mechanikai hatások keletkeznek és ezek hogyan befolyásolják a felületi réteg tulajdonságait. Ehhez a vágóerő mérését célozva, a forgácsolóerő összetevőinek elemzésére és szétválasztására specializált mérőberendezést terveztek (2.13. ábra).

Az esztergálás egy erőteljes dinamikus folyamat, összetett kapcsolatokkal és sok zavaró tényezővel. Ezért nagy pontossággal és sebességgel kell figyelemmel kísérni a folyamatot. A forgácsolási folyamat során keletkező vágóerők összetevőinek méréséhez egy erőmérő késtartót terveztek és készítettek el, amely négy rugalmas elemből áll, amelyek lehetővé teszik a forgácsoló erő komponensből származó deformáció felvételét a rugalmas elemek csomópontjain keresztül. A készüléket olyan mechanizmusnak tervezték, amely egy esztergagép szerszámtartójára szerelhető és csavarokkal rögzíthető a késtartóba. A rögzített esztergagép egy tömör fészekbe csatlakozik, négy elasztikus félköríves tartó formájában. Tenzogiver-eket helyeztek el a rugalmas elemek külső és belső hengeres felületeire.



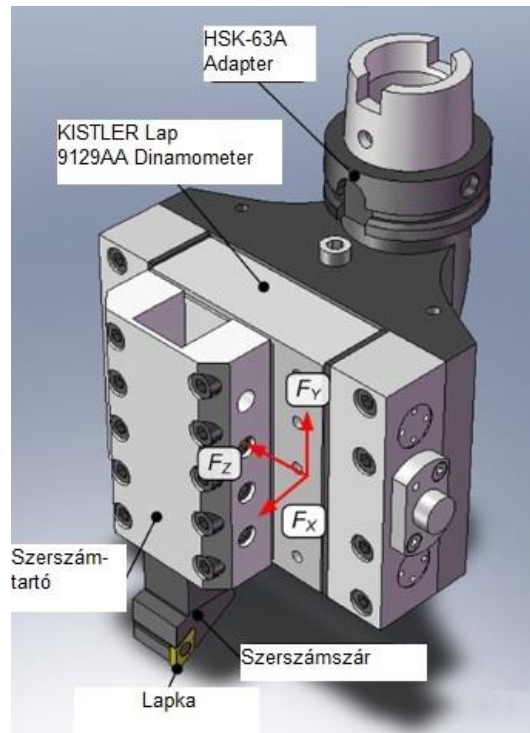
2.13. ábra Többkomponensű dinamométer a forgácsolási erők mérésére: a) dinamométer CAD modellje; b) a forgácsoló erők mérésére szolgáló szerelvény (Zablotskyi, 2017)

Mérési eljárás: a megmunkálás során a vágóerőt a műszeresen erőmérőkkel észlelik, majd a mérő átalakító feldolgozó egység ezeket az adatokat feldolgozza, ezt követően ezek értékelhetőek. (2.14. ábra)



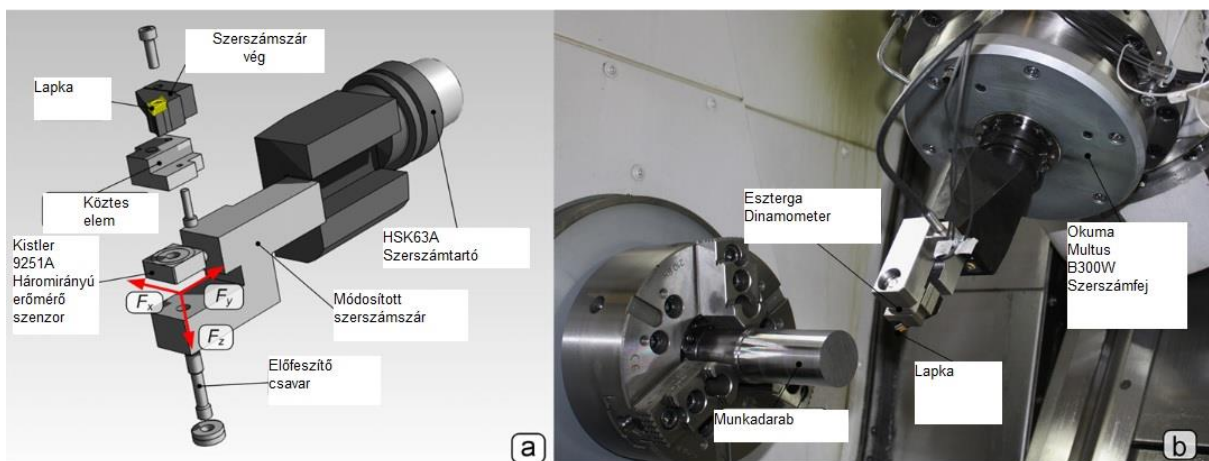
2.14. ábra A mérőrendszer összeállítási vázlata (Zablotskyi, 2017)

Totis és Sortino (2011) szintén egy komplex erőmérési módszert használt (2.15. ábra).



2.15. ábra A triaxiális befogó első verzió 3D szimulációs tervei (Totis és Sortino, 2011)

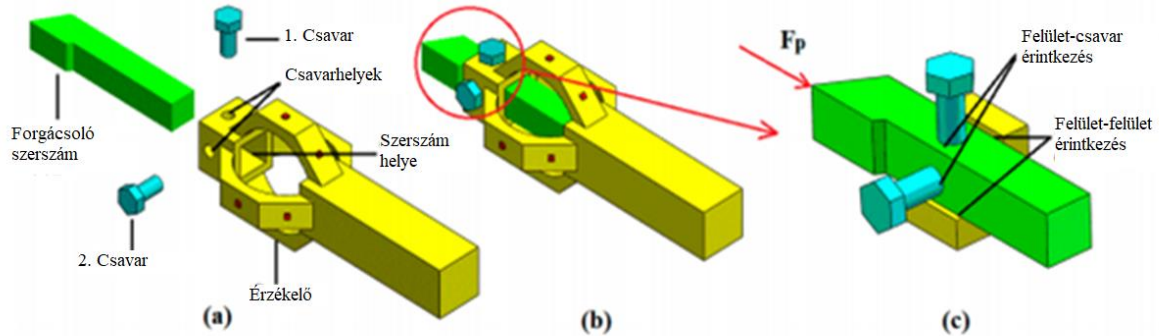
A készülék egy piezoelektromos erőgyűrűre épül, amely egy kereskedelmi célú szerszámkészletbe van integrálva, és moduláris kialakítása lehetővé teszi a vágóbetét könnyű cseréjét az érzékelő előterhelésének megváltoztatása nélkül. A prototípus eszközt összeállították és kísérletileg tesztelték statikus kalibrálással és dinamikus azonosítással, amely jó statikai és dinamikai jellemzőket mutatott. Végül az érzékelő üzemi körülmények között tesztelő munkadarab megmunkálásával tesztelték (2.16. ábra).



2.16. ábra A triaxiális forgácsoló erő méréséhez alkalmas dinamométer ábrái (Totis és Sortino, 2011)

Végezetül egy szintén nem szokványos erőmérési módszert láthatunk (2.17. ábra) Zhao és társai munkájában (2015). Ez a publikáció nagy teljesítményű, háromirányú forgácsolóerő-érzékelőt mutat be, amely kiváló pontossággal, kedvező természetes frekvenciával és elfogadható kereszt-interferenciával rendelkezik a nagysebességű forgácsolási folyamatokhoz. A

nyolcszögletű gyűrű a tervezett érzékelő érzékeny elemeként van kialakítva, ami a gyűrűelmélet inspirációjává vált. Két kölcsönös, merőleges nyolcszögletű gyűrű új struktúráját javasolják, és három Wheatstone teljes hídkötést alakítanak ki a triaxiális forgácsolóerő alkotóelemeinek bemérésére és a kereszt-interferencia korlátozása érdekében. Megállapították, hogy a rendszer kiváló pontossággal működik és nagy sebességű esztergálás esetén is alkalmazható.



2.17. ábra a) Az érzékelő vázlatos áttekintése a szerelés előtt; b) Az érzékelő vázlata a szerelést követően; c) A vágószerszám és az érzékelő közötti rögzítési mód egyszerűsített nézete (Zhao et al., 2015)

2.5. Fontos tribológiai fogalmak

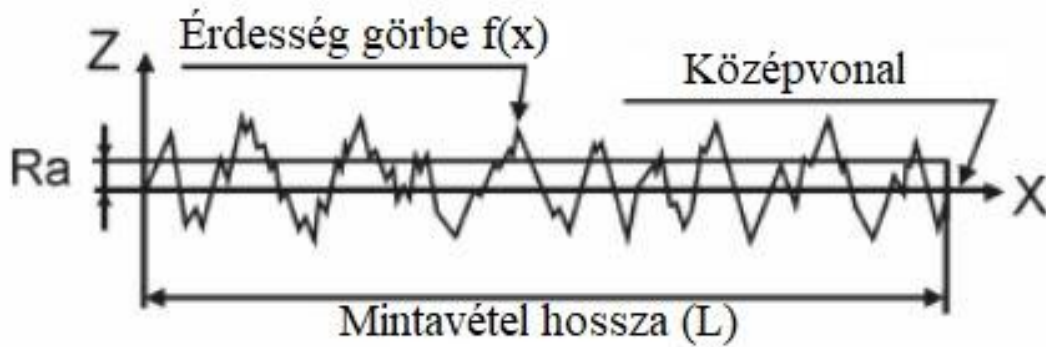
Ebben a fejezetben a kutatásom szempontjából lényeges tribológiai fogalmakat ismertetem részletesen. Szintén fontos terület a kopás tudománya, viszont disszertációmban nem foglalkozok kopással, így az erre vonatkozó szakirodalmi ismereteket nem mutatom be.

2.5.1. Felületek

A tribológia egyik jellemzője a felület minősége. A szilárdtestek súrlódó felszíne eltér az ideálistól. Az eltérések nagyságrendjük szerint csoportosíthatók:

- Makrogeometriai eltérés, vagy alakhiba: az ideális geometriai formától való eltérés, mint például az ovalitás, kúposág, hordósság, stb.
- Hullámosság: a felület közel periódikus eltérése a makrogeometriai alaktól. A hullámhossz általában 1-10 mm, míg a hullámmagasság 0,0005-0,5 mm.
- Érdesség: a hullámos felület mikroeltérése a hullámos felület geometriai alakjától. Az érdességsúcsok távolsága és magassága jelentősebb kisebb a hullámhossznál és a hullámmagasságnál.
- Szubmikro érdesség: a felületi érdességek felszínén lévő igen kisméretű egyenetlenség.

A gyakorlatban leggyakrabban használt mérőszámok az átlagos felületi érdesség (R_a) és az egyenetlenség-magasság (R_z). Átlagos felületi érdességen a valóságos profil pontjainak a középvonaltól mért átlagos távolságát értjük az alaphossz tartományán (2.18. ábra).



2.18. ábra Átlagos felületi érdesség (researchgate.net, 2021)

$$R_a = \frac{1}{L} * \int_0^L |f(x)| dx$$

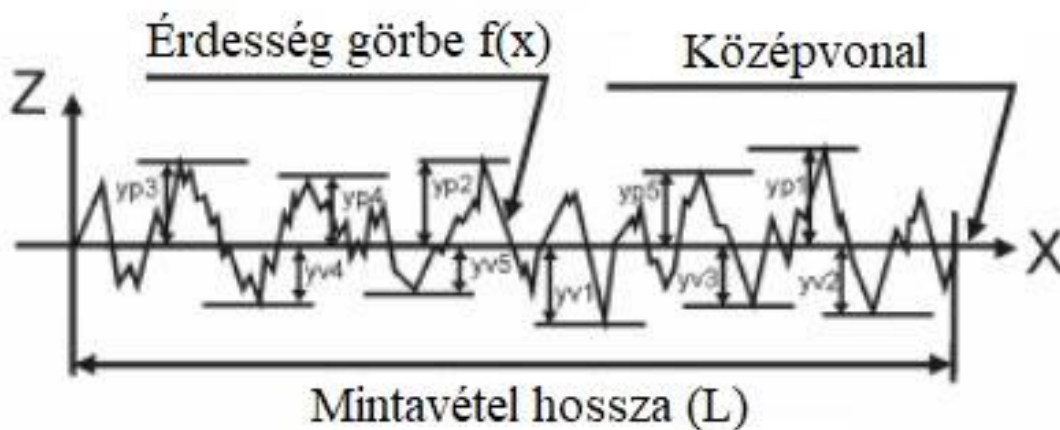
Ahol:

R_a – átlagos felületi érdesség [mm],

L – Mintavétel hossza (alaphossz) [mm],

Az egyenetlenség-magasságot (2.19. ábra) ritkábban használják, azonban a súrlódási vizsgálatok során igen nagy szerepe van, nem elhanyagolható mérőszám. Az alaphosszon belül az észlelt profil 5 legmagasabb és 5 legmélyebb pontjainak távolságából a következő képlet alapján számított átlag:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}$$



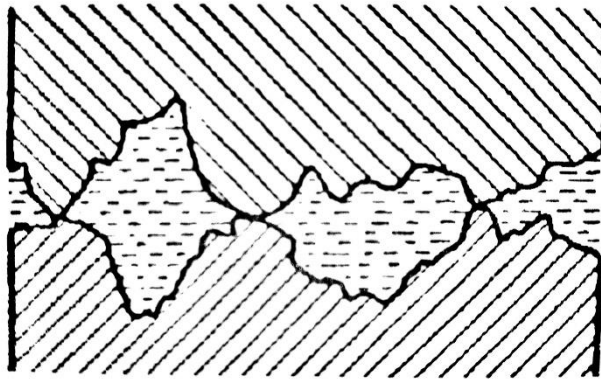
2.19. ábra Egyenetlenségmagasság (researchgate.net, 2021)

Ahol:

y_{pi} – a profilközépvonaltól mért i -edik legnagyobb egyenetlenségmagasság [mm],

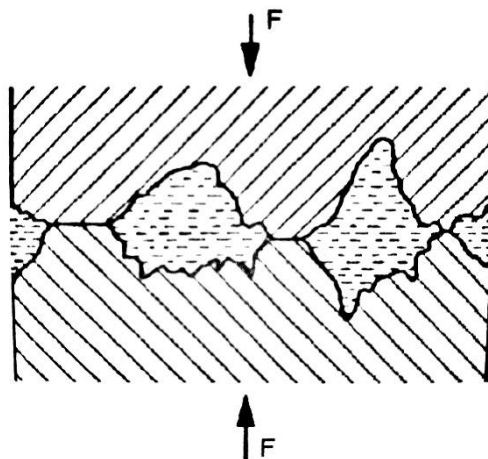
y_{vi} – a profilközépvonaltól mért i -edik legnagyobb egyenetlenségmélység [mm].

A korábban említett felületi jellemzők alapján belátható, hogy a szilárd testek sosem a teljes súrlódó felületükön érintkeznek egymással, hanem a két test A_n névleges érintkező felületének legkiemelkedőbb csúcsain. Ezt szemlélteti a 2.20. ábra.



2.20. ábra Névleges érintkezési felület (Valasek, 2002)

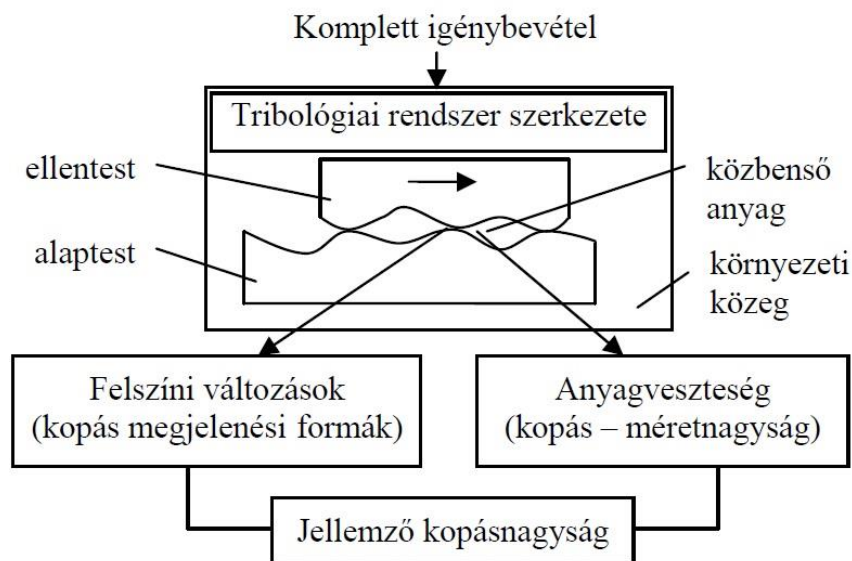
A csúcsokon a fellépő terhelés hatására az érintkező anyagok mechanikai tulajdonságainak, és a felületi érdesség alakjától függően rugalmas és/vagy képlékeny alakváltozás jön létre és elemi tényleges érintkezési felületek (A_t) alakulnak ki, melyek összegei adják a tényleges érintkezési felület nagyságát (A_t). A tényleges érintkezési felület kialakulását a 2.21. ábra mutatja.



2.21. ábra Tényleges érintkezési felület kialakulása terhelés hatására (Valasek, 2002)

2.5.2. Súrlódás

A súrlódás és a kopás igen bonyolult folyamatok. Rengeteg tényező hatást gyakorol rájuk, mint az érintkező testek geometriája, anyaga, az érintkezési felületek minősége, a kenési állapot, a mozgásviszonyok, a mozgás sebessége, a felületekre ható terhelés jellege és nagysága, a hőleadás, a környezet és egyéb fizikai vagy kémiai hatások. A 2.22. ábra az elemi tribológiai rendszert mutatja.



2.22. ábra Elemi tribológiai rendszer (Valasek, 2002)

A tribológiai rendszerben lejátszódó folyamatok bonyolultságának következtében, a rendszer viselkedését különböző szintű kísérleti tribológiai rendszerekkel határozzák meg.

A kutatók felismerték, hogy a súrlódásnak több fajtája létezik. A mérnöki gyakorlat a különböző súrlódási formákat egymástól elkülöníti. Ezek a formák:

- külső és belső súrlódás (a megjelenés helye szerint),
- csúszó és gördülő súrlódás (a mozgásforma szerint),
- nyugvó és mozgó súrlódás (a mozgásállapot szerint),
- száraz, határ, vegyes és folyadéksúrlódás (a kenésállapot szerint).

A külső súrlódásnak van nagyobb szerepe a mérnöki gyakorlatban. Ez a szilárd testek között az érintkező felületeken kialakuló kölcsönhatások eredménye, ami, ha megakadályozza egymáson való elmozdulásukat nyugvó, ha elmozdulás közben ellenállást fejt ki, akkor mozgó súrlódás. Ez energiavesztéssel jár, továbbá hőfejlődés is kialakul, ezen felül anyagvesztés is megfigyelhető. Az anyagvesztés a kopás. Ez mindig a súrlódás miatt, a súrlódás közben keletkező igénybevételek hatására alakul ki. Ennek ellenére nem hozható szigorú összefüggésbe a súrlódás és a kopás jelensége, nem szabad egyikből a másikra következtetni (Kozma, 2001; Keresztes, 2009).

Mielőtt kitérek a mozgásállapot és mozgásforma szerinti csoportosításra, fontosnak tartom letisztázni a súrlódási tényező fogalmát. A súrlódási tényező (μ) a súrlódási erő (F_s), és a súrlódási pályára merőleges erő, azaz a normál erő (F) hányadosa Amontons szerint (1699):

$$\mu = \frac{F_s}{F} [-]$$

Ez egy dimenzió nélküli szám, hiszen két erő arányát mutatja meg. Értéke mindig 0-1 közé esik. A gépészmérnöki gyakorlatban máig ezt az összefüggést használják.

A μ értékét általában kísérleti úton határozzák meg. Elmondható azonban, hogy értéke függ a hőmérséklettől, az érintkező felületek minőségétől, a terhelésektől, valamint a kenési állapottól,

mely szintén a felületek minőségével hozható összefüggésbe. Jankowiak et al. (2015) szerint a csúszási sebesség nagyon fontos és alapvető tényező, növelésével a súrlódási tényező csökken.

Coulomb egy 1779-ben megjelent művében kétségbe vonja Amontons törvényét. Szerinte ugyanis a súrlódási tényező a felületi érdességtől, valamint a molekuláris adhéziótól vagy kohéziótól függ. Megállapította, hogy a súrlódási erő nem arányos az F normál irányú erővel. A képletet a következőképp módosította:

$$F_s = \mu * F + b [N]$$

Az összefüggés első tagja a felületi érdesség kölcsönhatásából, míg a második tag a molekuláris erőkből adódik. Coulomb elmélete azt fejezte ki, hogy a súrlódási ellenállás a felületi egyenetlenségek egymáson való átjutásának eredménye. Nagysága az érdességi csúcsok átlagos Θ meredekségétől függ. Ez már valóságosabb felfogás, hiszen ez megmagyarázza, hogy a sima felületek sem súrlódásmentesek (Valasek, 2002).

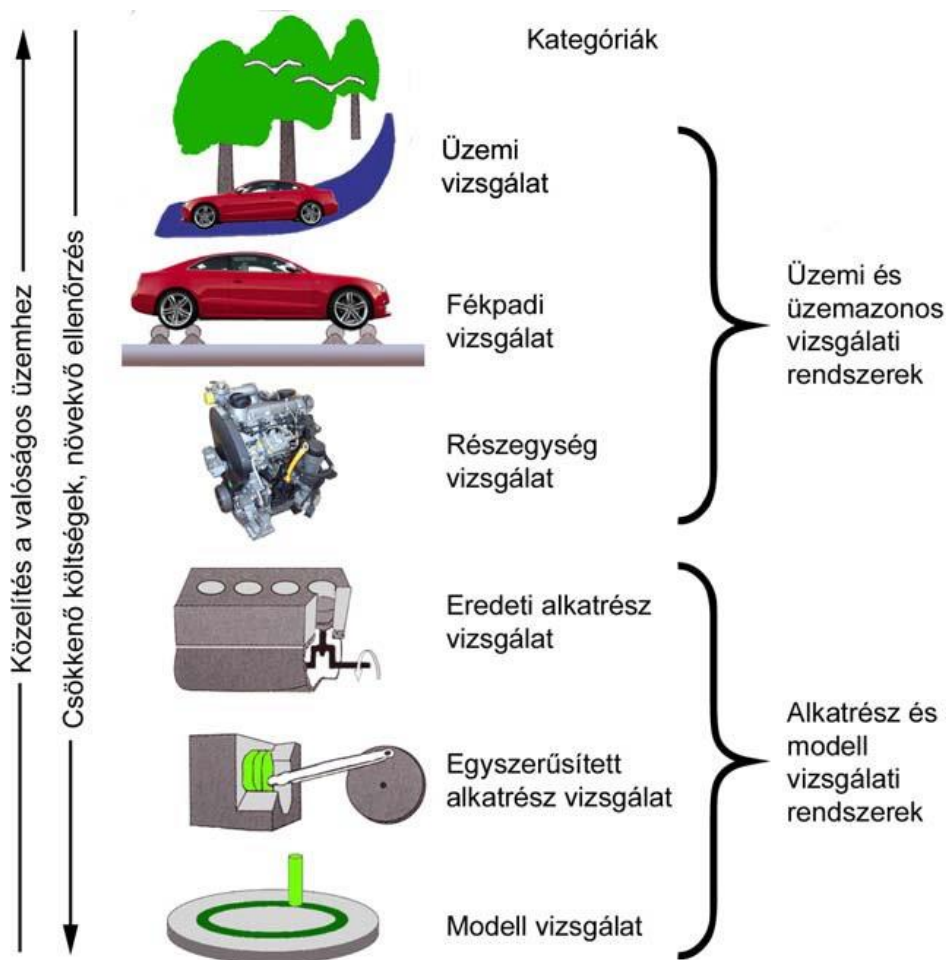
Disszertációm szempontjából fontosnak tartom megemlíteni a külső súrlódások közé tartozó mozgásforma és mozgásállapot szerinti súrlódásokat.

A tapadó súrlódás, más néven nyugalmi súrlódás az elmozdulás ellen hat, és határesetben a csúszás megindulásakor arányos az F_N normál irányú erővel. A tapadó súrlódási tényező mindig nagyobb, mint a már egymáson elmozduló felületeken létrejött csúszó súrlódási tényező. Ez azzal magyarázható, hogy az érdes felületek érdességszcúcsai nyugalmi állapotban jobban összeakadnak. A csúszó súrlódás, vagy mozgás béli súrlódás esetén is alkalmazható a Coulomb törvény. Az egyenletes mozgásállapot fenntartásához kisebb erő szükséges, mint a mozgást megindítani, azaz a tapadó súrlódást legyőzni. A két súrlódó állapot mintegy vegyes eredménye az akadozó súrlódás (stick-slip), ami műszaki gyakorlatban igen gyakran előforduló nem kívánatos jelenség. Ha a súrlódó felületek egyike bizonyos fokú elasztikus szabadsággal rendelkezik, akkor jön létre az akadozó csúszás az egyenletes csúszás helyett. Tapadási és csúszási mozgásállapotok periodikusan váltják egymást. Ezt a mozgásformát 1937-ben tapasztalták először. A gördülő súrlódás a forgástest geometriájú elemek gördülésekor fellépő jelenség. Nagyságrendekkel kisebb az értéke a száraz csúszási súrlódáshoz viszonyítva.

2.5.3. Tribológiai modellvizsgálatok

A tribológiai folyamatok általában igen bonyolultak, ezáltal az elméleti összefüggések csak korlátozott érvényben igazak. Emiatt a tribológiai kutatások általában kísérleteken alapulnak. Mérésekkel meghatározhatók a súrlódó rendszer súrlódási, kopási viszonyai. A tribológiai vizsgálatokat több szempontból lehet csoportosítani. A legfontosabb tényező a csúszási-súrlódási folyamat, mely lehet szakaszos, illetve folyamatos. A nagyszámú konstrukciós- és vizsgálati elv közül a folyamatos csúszásúakat részletezem a továbbiakban, hiszen kutató munkám során az esztergálás tribológiáját vizsgálom, ahol megmunkálás közben a szerszám és a leváló forgács között folyamatos súrlódási kapcsolat jön létre.

A gyakorlatban különböző szintű vizsgálatokat használnak. Ezeket a szinteket mutatja a 2.23. ábra.



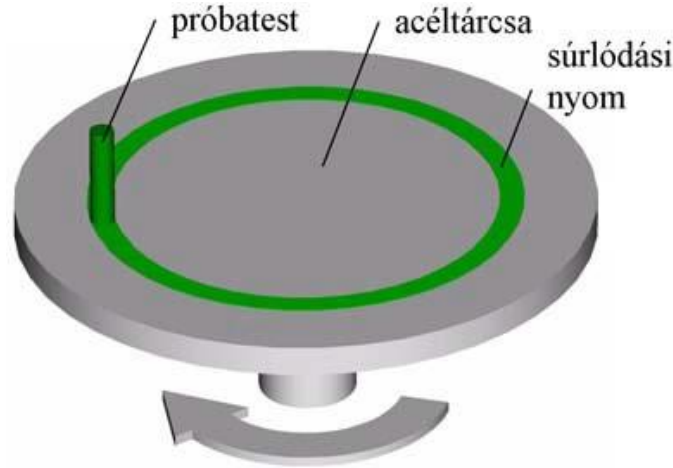
2.23. ábra Tribológiai vizsgálatok csoportosítása (Keresztes, 2009)

A 2.23. ábra mutatja a tribológiai vizsgálatok csoportosítását a DIN 50322 szabvány szerint. A feltüntetett felső három csoportba tartoznak a kész gépeken vagy azok egy részegységén elvégzett üzemi vagy üzemazonos vizsgálatok, ahol a rendszert vagy az üzemi körülményeknek megfelelő, vagy a vizsgálatok idejének lerövidítése érdekében annál fokozottabb igénybevételeknek teszik ki. A másik három csoportba tartoznak a modellvizsgálatok, amelyeket az eredetivel megegyező alkatrészen, kismintán, a rendszerben fellépő igénybevételeket szimuláló elemeken, vagy könnyen nagy pontossággal gyártott egyszerű alakú próbatesteken végeznek el. A tribológiai vizsgálatok bonyolultsága az üzemi vizsgálatoktól az egyszerűsített modellvizsgálatokig fokozatosan csökken, és ezzel együtt a vizsgálatok költségei kisebbek lesznek. Ezért a vizsgálatokat minél egyszerűbb eszközökkel célszerű elvégezni. A vizsgálatok egyszerűsítésével azonban a súrlódó pár működési feltételei jelentős mértékben megváltozhatnak, és az ilyen körülmények között végzett mérések eredményeiből nehezebb a valós szerkezet üzemeltetésekor kialakuló tribológiai paraméterekre következtetni. A modellvizsgálatok kiválasztásakor arra kell törekedni, hogy a vizsgálati feltételek minél jobban megközelítsék a valóságos üzemi körülményeket (Kozma, 2001).

A modellvizsgálati csoport függvényében megkülönböztetünk kis- és nagyméretű próbatesteken végzett vizsgálatokat.

2.5.4. Pin-on-disc típusú tribológiai kisminta modellvizsgálati rendszer

A pin-on-disc vizsgálatok magyar megfelelője a tű a tárcsán, de szokás ezt a vizsgálati rendszert rúd-tárcsa modellnek is nevezni. A DIN 50322 szabvány vonatkozik rá. A leggyakrabban alkalmazott modellvizsgálati rendszer. A szakirodalomban számos kutatás alapszik ilyen rendszeren végrehajtott vizsgálatokon. Elvi vázlatát a 2.24. ábra szemlélteti.



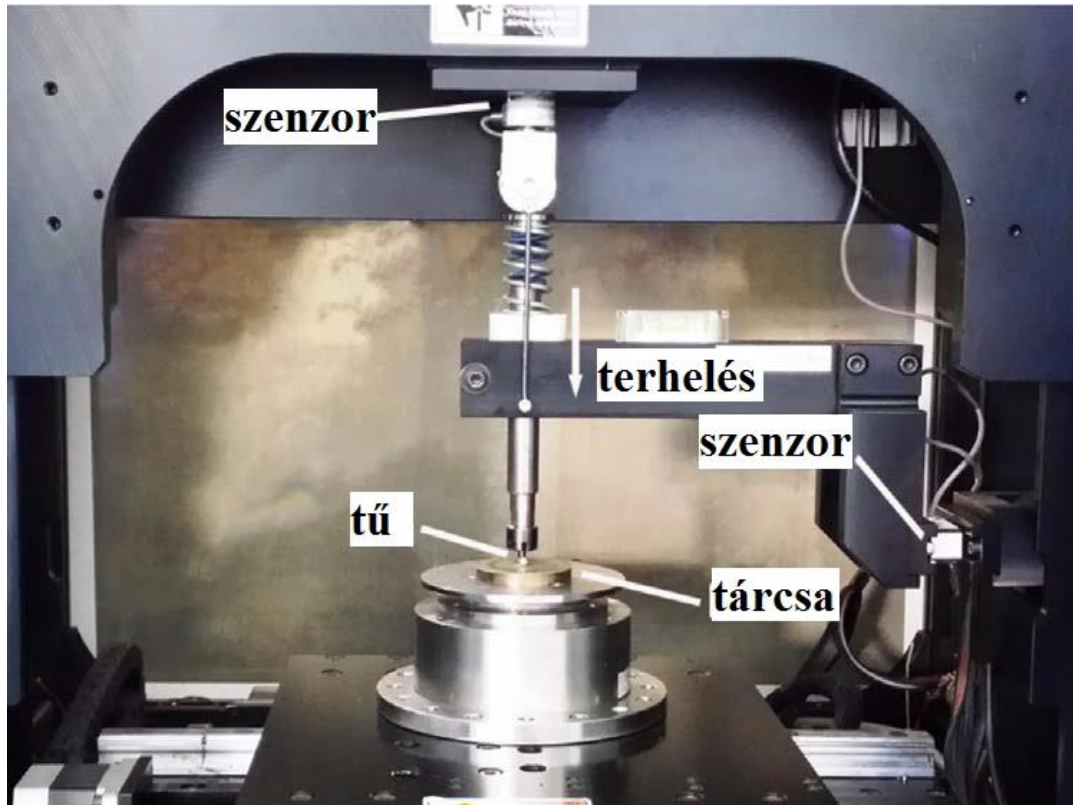
2.24. ábra Pin-on-disc vizsgálat elvi vázlata (Keresztes, 2009)

A vizsgálatokhoz szükséges, általában valamilyen egyszerű geometriájú, például henger vagy hasáb alakú próbatest nagy pontossággal gyártható, mely nagymértékben megnöveli a vizsgálatok megbízhatóságát. Gyártásuk egyszerű és olcsó. A rendszer jellemzője a folyamatos csúszó súrlódás. Az ábrán látható próbatest valamilyen terheléssel nyomódik a tárcsára, melynek anyaga leggyakrabban acél, de lehet bármely más is. A tárcsa forog, a tű áll, így jön létre a súrlódás.

Kutatásom során pin-on-disc vizsgálati rendszert alkalmazok, ezért a következő fejezetben bemutatom a korábbi kutatásokat, melyek legszorosabban kapcsolódnak a témához a vizsgálati módszereket, illetve az anyagokat (polimerek) tekintve.

2.5.5. Tribológiai vizsgálatok a gyakorlatban

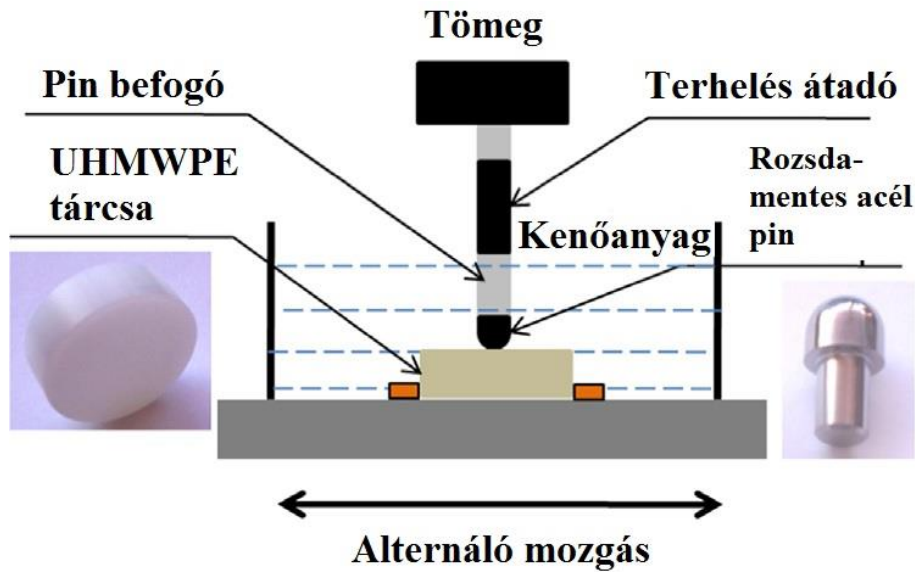
Wang et al. 2017-ben végzett pin-on-disc vizsgálatokat száraz súrlódás és vízkenés esetén. Céljuk az anyagi jellemzők kutatása és fejlesztése volt vízkenésű csapágyakhoz. A vizsgált anyagok az alap ultranagy molekulatömegű polietilén (UHMWPE), ennek üvegszálalás és szénszálalás kompozitja, valamint egy hibrid kompozit, amelyben üveg- és szénszálalás egyaránt vannak. A kompozitok mindhárom esetben 10 tömegszázalékban tartalmaztak erősítő anyagokat. A tárcsa anyaga GCr15 jelű acél. A vizsgálatok során változtatták a csúszási sebességet, a normál irányú statikus terhelést és a tárcsa felületi érdességét.



2.25. ábra Tribotester pin-on-disc vizsgálatokhoz (Wang et al., 2017)

A 2.25. ábra mutatja a vizsgálati berendezést, a fontosabb elemekkel. Minden vizsgálati beállításon elvégezték a méréseket. A súrlódási tényezőre vonatkozó méréseket 10 percig végezték, míg a kopási vizsgálatok időtartama 6 óra volt. A vizsgált anyagok súrlódási tényezője csökkent, amikor valamilyen erősítő szálakat tartalmazott, de vízfelvételük némileg nőtt. A vízkenés szintén javított a súrlódási értékeken. A hibrid kompozitnak volt a legjobb a súrlódási tulajdonsága minden vizsgálati paraméter esetén. A legkopásállóbb anyag az üvegszálás kompozit volt. A kompozit anyagok vizsgálatakor, amikor az érintkezési felülethez egy erősítő szál kerül a korábbi anyageltávolodás miatt, akkor ott egyfajta kidudorodás jelenik meg a szál miatt. Emiatt csökken az érintkezési felület, így a súrlódási tényező is. A legjobb kopási tulajdonságot a szénszálás kompozit mutatta.

Guezmil et al. (2015) pin-on-disc vizsgálatokat végzett bio-kenőanyagok súrlódásra való hatása végett. A 2.26. ábra mutatja a vizsgálat elvi felépítése.

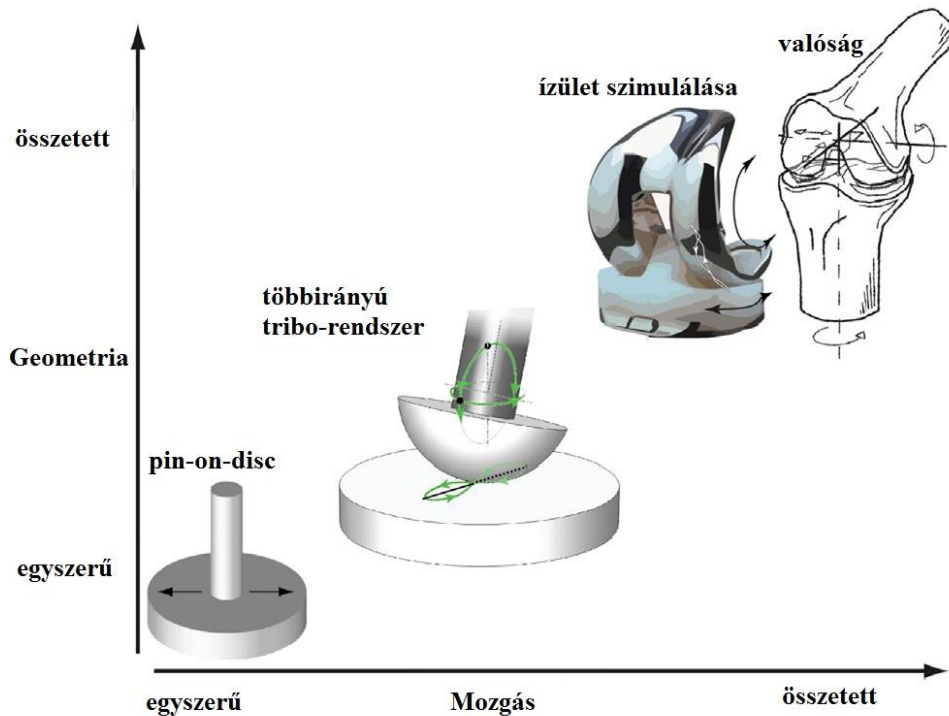


2.26. ábra Alternáló mozgást végző pin-on-disc berendezés sematikus vázlata (Guezmil et al., 2015)

Ebben az esetben a tű áll, a tárcsa pedig alternáló mozgást végez. A terhelés állandó. A tű anyaga M30NW rozsdamentes acél, a tárcsa anyaga UHMWPE. A tű a tárcsával érintkező oldalán félgömb alakú. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten végezték. Az alternáló mozgás lökete 30 mm, a csúszási sebesség 30 mm/s. A ciklusok számát úgy állították be, hogy a bejárt út hossza 450 mm volt. A súrlódási erőt a terhelésátadó elemen mérték. A vizsgálatból megállapították, hogy a legnagyobb súrlódási tényező és kopás száraz súrlódási feltételek mellett valósult meg.

Patten et al. (2013) pin-on-disc típusú vizsgálattal kutatta az emberi térd súrlódási és kopási mechanizmusát. A vizsgálatot egy komplex vizsgálóberendezésen végezték, mely az alap henger-tárcsa kapcsolatot kiegészíti billenő, illetve alternáló mozgásokkal. A 2.27. ábra mutatja a vizsgálati elgondolást.

A kutatásból látszik, hogy a pin-on-disc vizsgálatok, egy nagyon összetett probléma megoldásának alapjául szolgálhat.



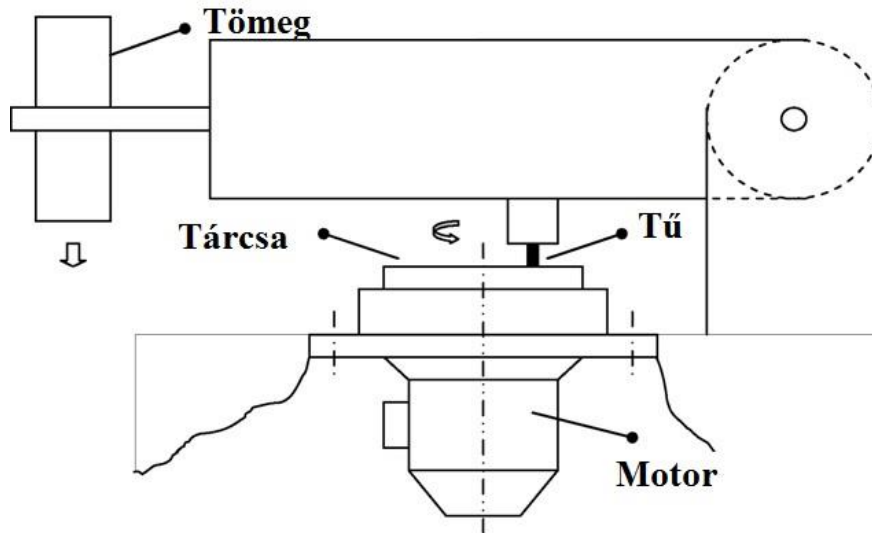
2.27. ábra Az egyszerű modellvizsgálat jelentősége (Patten et al., 2013)

Sivaraos et al. (2013) polipropilén és annak hulladékabroncs őrleményéből készített kompozitjának súrlódását vizsgálta különböző tömegszázalékos anyagoknak pin-on-disc módszerrel. A tárcsa anyaga volt a vizsgálandó anyag, a tű anyaga réz. Száraz súrlódási viszonyok közt végezték a vizsgálatokat. Állandó statikus terhelést alkalmaztak, állandó tárcsafordulat mellett. A vizsgálatok időtartama 300 másodperc volt. A csúszási úthosszt változtatták.

Puls et al. (2013) kísérleti úton kutatta a megmunkáló szerszám és a munkadarab közti súrlódási viszonyt fémgörgetés közben. Szerintük az egyszerűsített modellvizsgálatok hátránya ilyen jellegű vizsgálatok során, hogy az érintkezési felületek geometriája nem teljesen meghatározott görgetés közben a lágyabb anyag pont, vonal vagy félgömb-szerű plasztikus deformációja miatt. Kísérleteiket emiatt ortogonális görgetési körülmények közt végezték, azaz egyélű szerszámmal.

Laux és Schwartz (2012) pin-on-disc vizsgálatokat végzett PEEK anyagon az anyagátviteli folyamatot és kopást vizsgálva. Kimondták, hogy egyirányú tribológiai rendszereknél, a polimerláncok a mozgás irányába rendeződnek, ezért ilyen jellegű vizsgálatoknál ajánlott a legalább két tengelyű mozgást végző vizsgálati berendezés. A tesztek két statikus terheléssel végezték, a csúszási út körülbelül 5 km volt, állandó sebességen. A tárcsa edzett szerszámacélból készült. Megállapították, hogy PEEK anyagok esetén a kopás nagymértékben függ a terheléstől. Az anyagátvitel ott volt a legjelentősebb, ahol a tű merőleges irányban mozgott a felületi csúcsok orientációjához képest. Az anyagátvitel nem mutatott közvetlen kapcsolatot a kopással.

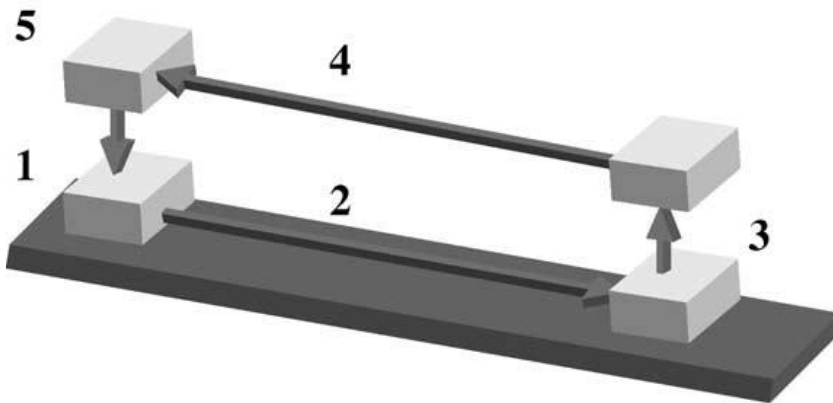
Sumer et al. (2008) PEEK és 30 tömegszázalékban üvegszálerősített PEEK kompozitot vizsgált száraz súrlódási körülmények és vízkenés esetén pin-on-disc vizsgálatokkal. A 2.28. ábra a vizsgáló berendezés sematikus ábráját mutatja.



2.28. ábra Pin-on-disc triboteszter sematikus vázlata

A tárcsa anyaga AISI D2 jelű acél volt. A vizsgálatokat eltérő terhelés és csúszási sebesség mellett végezték. Kenést alkalmazva kedvezőbb súrlódási és kopási feltételek adódtak. A kopást kis mértékben befolyásolta a terhelés, de jelentős befolyást a kenési állapot jelentett. Megállapították továbbá, hogy a vizsgálati tartományban a nyomás-sebesség ($p \cdot v$) érték nem fejtett ki hatást a vizsgált anyagokra.

Mergler et al. (2004) a POM anyagátviteli folyamatát vizsgálta slider-on-sheet (csúszka a síkon) és pin-on-disc típusú vizsgálatokkal, majd ezek eredményeit vetették össze. A 2.29. ábra a slider-on-sheet vizsgálat sematikus ábráját mutatja.



2.29. ábra Slider-on-sheet típusú tribológiai vizsgálat elvi vázlata

E vizsgálati módszer lényege, hogy a próbatestet az ellendarabon elhúzzák, bizonyos normál irányú terhelés mellett, majd felemelik, a levegőben a kezdőpont fölé, majd a kezdőpontra teszik, és a ciklus ismétlődik a beállítási paramétereknek megfelelő számban. Az ellendarab AISI 304 rozsdamentes acél volt, míg a pin-on-disc vizsgálatnál a tárcsa anyaga 100Cr6 edzett acél. A vizsgálatokat elvégezték POM-C próbatestekkel POM-C ellendarabon is. Megállapították, hogy a slider-on-sheet vizsgálatok jobb betekintést nyújtanak az anyagátviteli folyamatokat illetően. Az anyagátvitel a súrlódási tényező növeléséhez vezet.

Unal et al. (2003) politertafluor-etilén és annak kompozitjainak csúszási súrlódási és kopási tulajdonságait kutatta kenésmentes állapotban pin-on-disc vizsgálati módszerrel. A kompozitok üvegszálat, valamint bronz és szén töltőanyagot tartalmaztak. A tárcsa anyaga AISI 440C acél. A vizsgálati paraméterek közül a csúszási sebességet és a statikus terhelést változtatták. A cél a súrlódási együttható, az anyagvesztés és a fajlagos kopás meghatározása volt.

Unal és Mimarogulu (2003) PA 6, POM és UHMWPE gépészeti polimerek súrlódási és kopási viselkedését vizsgálták pin-on-disc módszerrel. A statikus terhelést és a csúszási sebesség értékét módosították a vizsgálatok során. A kopási értékekre a próbatestek tömegcsökkenéséből következtettek. Megállapították, hogy a PA 6 fajlagos kopása egy nagyságrenddel kisebb, mint az UHMWPE-nek mm^3/Nm -ben megadva. A vizsgálati tartományban a súrlódási tényező némileg nőtt a terhelés növelésével. A legnagyobb fajlagos kopás a POM-nál, míg a legkisebb az UHMWPE-nél volt megfigyelhető. Általánosították, hogy a kopási rátára nincs befolyása a terhelés változásának. A vizsgált anyagok kopására nagyobb hatása volt a sebességnek, mint a terhelésnek.

Xiong és Ge (2001) UHMWPE anyagot vizsgált Al_2O_3 tárcsán különféle kenési feltételek mellett. A vizsgálatokat $37\text{ }^\circ\text{C}$ -on végezték. A kenés nélküli esetben volt a kopás a legnagyobb, míg plazmakenés esetén a legkisebb. A csúszási úthossz minden vizsgálat esetében 10 km volt. A kopást tömegvesztés alapján mérték.

Palabiyik és Bahadur (2000) PA 6 és HDPE blendek mechanikai és tribológiai tulajdonságait kutatta kompatibilizátor adalékkal és anélkül szintén pin-on-disc típusú vizsgálattal.

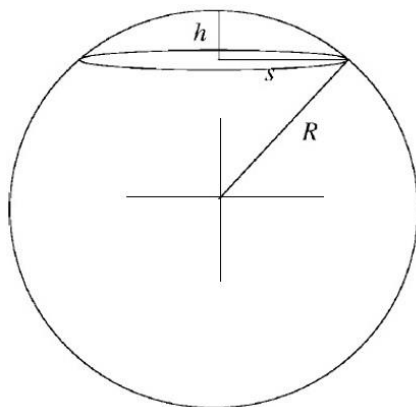
Harris és Krauss (2001) egy technikát fejlesztett ki, mellyel a ball-on-disc, azaz a golyó a tárcsán típusú vizsgálatok esetén a kopási felület profiljából számítható a kopás mértéke és az eltávolított anyag mennyisége. Szerintük a korábbi ball-on-disc vizsgálatoknál ezeknek a számítása hibás volt. Az eltávolított anyagmennyiség a következő képlettel számítható:

$$V = \pi * \left(h * R^2 - \frac{R^3}{3} + \frac{(R - h)^3}{3} \right) [\text{mm}^3]$$

Ahol h a Pitagorasz-tételből:

$$h = R - \sqrt{R^2 - s^2} [\text{mm}]$$

A 2.30. ábra a betűk magyarázatát mutatja. R a gömb sugara, h a gömbszelet magassága, s a gömbszelethez tartozó alapkör sugara.



2.30. ábra A képlet magyarázata (S. J. Harris és G. G. Krauss, 2000).

A ball-on-disc vizsgálatok nagyon hasonlóak a pin-on-disc vizsgálatokhoz, csupán annyi a különbség, hogy a befogó egységbe a henger vagy hasáb geometria helyett egy gömb anyagot fogunk be.

2.6. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

Kutatási témám jellegéből adódóan a szakirodalom elemzése különböző tudományterületek együttes áttekintését igényelte:

- elsőként a polimereket és polimer kompozitokat mutattam be, azok általános jellemzőit, forgácsolásukhoz tartozó - fémektől eltérő - különleges igényeit,
- áttekintettem az esztergálással kapcsolatos, rezgésekkel foglalkozó kutatómunkákat,
- bemutattam az esztergálás erőmérési módszereit, melyeket sikerrel alkalmaztak korábban a kutatók a gyakorlatban,
- végül ismertettem a tribológiai alapokat, modellvizsgálati módszereket, valamint bemutattam a tribológiai mérések gyakorlati alkalmazásait.

Kutató munkám során azt tapasztaltam, hogy esztergálásra vonatkozó korábbi kutatómunkák számtalan mennyiségben fellelhetők. Ezek a munkák azonban általában valamilyen fémötvözet alapanyagú munkadarabok forgácsolás közbeni viselkedését részletezik.

Habár a polimer anyagok egyre inkább elterjednek számítanak mind a mindennapjainkban, mind a műszaki gyakorlatban, ezeket az anyagokat és a kompozit polimereket még mindig kevésbé ismerjük. A kutatók főleg a nagy teljesítményű polimer anyagokkal foglalkoztak, a megmunkálást tekintve pedig főleg maró vagy fúró kísérleteket végeztek.

Intézetünkben foglalkoztak korábban műanyagok esztergálásával (Farkas Gabriella, 2010), viszont nem kutattak kompozit anyagokat, illetve e kutatás fő célja a megmunkált felületi érdességek vizsgálata volt.

Az esztergálás során fellépő rezgéseket illetően szintén található szakmai cikkek, dokumentációk, melyek rezgésmérést tartalmaznak. Ezek a munkák szintén fém munkadarabon mért rezgéseket vizsgálnak.

A polimerek tribológiai kisminta modell-vizsgálatait tekintve hasonlóan a korábban leírtakhoz, vagy fém próbatesteken végeztek vizsgálatokat, vagy nagy teljesítményű polimer anyagokon, holott a műszaki műanyagok csoportjában legalább annyira fontos ismernünk az idetartozó anyagok tribológiai jellemzőit, mint korszerűbb, nagy teljesítményű társaiknál.

A fémek és a polimerek tulajdonságai merőben eltérők. A fémekre elterjedt modellek, kísérleti módszerek nem illeszthetők be polimer alapú anyagok kutatásába.

Olyan összetett kutatásra nem leltem szakirodalmi áttekintésem során, mely polimer vagy polimer kompozit anyag esztergálása során kapott eredményeket ültette volna át tribológiai vizsgálatok bemeneti paramétereiként. Céлом, hogy tribológiai vizsgálataimat ily módon végezzem el, beleértve a nem elhanyagolható, negatív rezgésből adódó jelenségeket és olyan megállapításokat tegyek, melyek a polimerek megmunkálásával kapcsolatban hasznos információval szolgálnak.

2.1. táblázat Kutatási területek az évtizedek függvényében (forrás: scholar.google.com)

Kutatási terület	1960-	1970-	1980-	1990-	2000-	2010-	Jelenlegi évtized
Forgácsolási erők mérése polimer anyag esetén	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Forgácsolási erők mérése polimer kompozit anyag esetén	X	X	X	X	✓	✓	✓
Vibrációval támogatott esztergálás	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vibrációval ellátott tribológiai vizsgálatok	X	X	X	✓	✓	✓	✓
Tribológiai vizsgálatok kompozit polimereken	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
Vibráció mérése műszaki polimer munkadarab megmunkálása esetén	X	X	X	X	X	X	X
Polimer esztergálás modellezése tribológiai kisminta modellvizsgálat segítségével	X	X	X	X	X	X	X

A 2.1 táblázat foglalja össze a kutatási témámat érintő tudományterületeket az évtizedek függvényében. A táblázat megmutatja, hogy mely területeket melyik évtizedben kezdték kutatni.

Látható, hogy a polimer kompozitok forgácsolási eredményein alapuló modellezés vibrációval ellátott tribológiai kisminta modellvizsgálattal még nem történt meg, ezért célom, hogy ebből az aspektusból vizsgáljam az anyagokat és a leváló forgács és a megmunkáló szerszám közötti kölcsönhatás alapján a súrlódási erőre vonatkozó összefüggést állapítsak meg.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket és eszközöket, amelyek a vizsgálataimhoz használt programok, illetve a kísérletekhez létrehozott kisminta rendszer és a rendszert felépítő elemek.

3.1. Esztergálási vizsgálatok

Ebben az alfejezetben részletesen ismertetem a vizsgált polimer alapanyagok tulajdonságait, a megmunkálás eszközeit, és a mérési módszert, beleértve a beállított paramétereket és mért értékeket.

3.1.1. Esztergálási vizsgálatok polimer alapanyagai

Kutatásom során három anyagon végeztem esztergálási vizsgálatokat. Alap polimernek az extrudált Poliamid 6 (továbbiakban: PA 6 E) polimert választottam, mert ez az anyag igen elterjedt a műszaki gyakorlatban, emellett viszonylag alacsony áron elérhető, jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. A gyártó által megadott műszaki adatokat mindhárom anyag esetén az M3 melléklet tartalmazza.

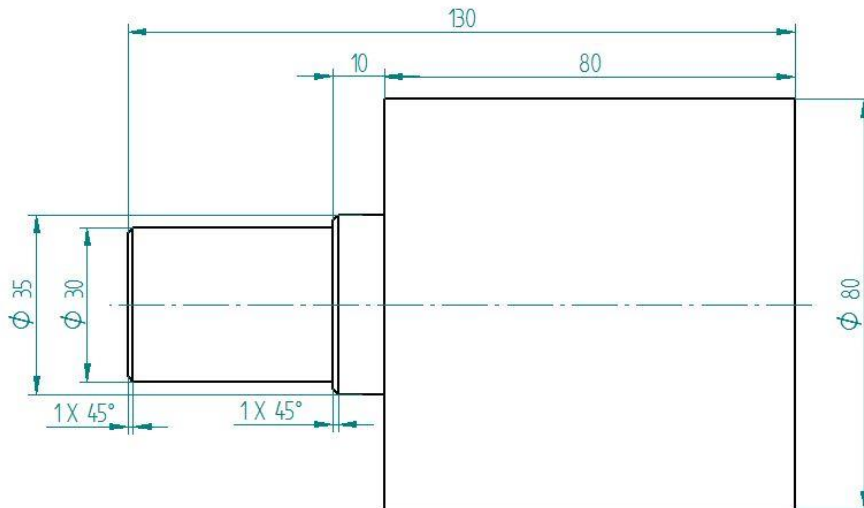
Az alap PA 6 E mellé további két kompozitot választottam. Az egyik kompozit a 30 tömegszázalékban üvegszál-tartalmazó extrudált PA 66 GF30. Az elnevezés a mátrix anyagra (PA 66 E), illetve az adalékra (Glass Fiber, azaz üvegszál), valamint az adalék tömegszázalékos arányára utal (30 %).

Kutatásom harmadik vizsgált anyaga a PA 6G-H ELS. Ebben az esetben a mátrix polimer öntött PA 6, az adalék pedig vezetőképes korom.

A PA 6G-H ELS anyag műszaki adatlapja a gyártói honlapon nem szerepel, viszont kérésemre megosztották velem az adatokat, melyek szintén az M3 mellékletben láthatók.

3.1.2. Az esztergálási vizsgálatok próbatestei

A fent említett háromféle anyagot Ø80x130 mm-es fűrészelt darabokban kaptam meg a gyártótól. Próbaméréseimet csupán a homloklapfelületek tisztára esztergálása után kezdtem, ám ez nem volt szerencsés a tokmányba befogás miatt. Emiatt először ezeket az alapanyagokat egy adott geometriára esztergáltam. Ezt a geometriát mutatja a 3.1. ábra. A munkadarabok műhelyrajzát az M4 melléklet tartalmazza.



3.1. ábra A vizsgált munkadarab rajza

Vizsgálataim során a legkisebb átmérőt (Ø30 mm) helyeztem a tokmányba, úgy, hogy a tokmánynak ütköztettem az Ø35 mm-es lépcsőt. Az Ø35 mm-es szakaszt egyrészt a tokmányhoz ütköztethetőség, másrészt az esztergakés kifutásának biztosítására alakítottam ki. A vizsgált esztergálási folyamatokat a legnagyobb átmérőn (Ø80 mm) végeztem. Ezt a vizsgált szakaszt (80 mm hossz) négy egyenlő szakaszra bontottam (4x20 mm). Esztergálásnál a munkadarab nullpontját a tokmánytól 92 mm távolságra programoztam, a szimmetriatengelyre. Ez a távolság magába foglalja a 10 mm-es, Ø35 mm-es szakaszt, a 80 mm hosszú Ø80 mm-es mérési szakaszt, valamint 2 mm-t a biztonságos megközelítés biztosítása érdekében, amely gyorsjárásban történt.

3.1.3. Szerszámgép és szerszámok

Vizsgálataimat a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézetének gödöllői Tanműhelyében végeztem (Korábban: Szent István Egyetem, Gépipari Technológiai Intézet tanműhelye) egy NCT EUROturn 12-B típusú CNC esztergagépen. A gép főbb műszaki adatai a következők (www.nct.hu, 2016):

Legnagyobb elforduló átmérő az ágy felett (mm)	310
Legnagyobb elforduló átmérő a keresztcsán felett (mm)	120
Legnagyobb esztergálható átmérő (mm)	120
Csúcstávolság (mm)	300
Ajánlott tokmány átmérő (mm)	160
Főorsó fordulatszám (1/perc)	50-6000
Főorsó homlok mérete (-)	A2-5
Főorsó melső csapágy átmérő (-)	85
Tartós főorsó teljesítmény (kW)	7
Legnagyobb főorsó nyomaték (Nm)	67
X/Z löket (mm)	144/420
Gyorsmenet X/Z (m/perc)	15/30
Villamos csatlakozás (VAC/A)	16A
Nettó tömeg (kg)	1200

A készár egy szabványos SCLCR 20.20 K09 típusú készár volt. Ahhoz, hogy nyúlásmérő bélyegeket lehessen ráhelyezni, a 20x20 mm-es szárat le kellett munkálni 16x16 mm-re. Így biztonsággal elfértek a nyúlásmérő bélyegek, továbbá biztosított, hogy az igénybevételek a készár megfelelő helyein legyenek a mérvadók. A módosított készárt szemlélteti a 3.2. ábra.



3.2. ábra A módosított, nyúlásmérő bélyegekkel ellátott készár

Az ábrán nem látható a horony, amely szintén utólagos megmunkálással került a szárba. Ebben a horonyban futnak a nyúlásmérő bélyegek kábelelei, nem lógnak ki, így semmilyen módon nem akadályozzák a készár befogását a késtartóba.

A késtartó a felbélyegzett készárhoz lett elkészítve, szintén utólagos megmunkálással egy DIN69880 szabványos B7-20x16x30 késtartóból. A szabványos késtartóba -mint ahogy típuszáma is mutatja – 20x16 mm-es készár tehető, így marással 20x20 mm-es készárok befogására is alkalmassá tettük.

A készár típusa meghatározza, hogy milyen típusú és geometriájú eszterga váltólapkák helyezhetők a szárba. Az SCLCR típus a következőket jelenti:

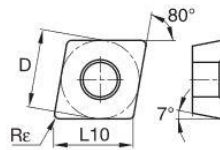
- S: csavarral történő lefogatás
- C: 80°-os rombusz alakú lapkák
- L: 95°-os élelhelyezési szög
- C: 7°-os hátszög
- R: jobbos szerszám

Váltólapkának CCGW09T304FST típusú, KD1425 osztályú polikristályos gyémánt bevonatú lapkát választottam (3.3. ábra).



3.3. ábra A választott esztergálási váltólapka

A váltólapka főbb adatait mutatja a 3.4. ábra. A gyártó szerint ez a polikristályos gyémánttal bevont lapka (PCD) az iparban található lapkák közül a leginkább kopásálló. Abráziós ellenállása rendkívül magas. A gyártó nemvasfémekhez és nemfémes anyagokhoz ajánlja. Ezen okok miatt választottam ezt a típust, hiszen a vizsgált kompozit anyagok között például szerepel egy üvegszálás változat, mely a lágyabb szerszámokat elkoptatná a kísérletek során.



ISO catalog number	ANSI catalog number	D		L10		Rε	
		mm	in	mm	in	mm	in
CCGW060204FST	CCGW2151FST	6,35	1/4	6,45	.254	0,4	1/64
CCGW09T304FST	CCGW3251FST	9,53	3/8	9,67	.381	0,4	1/64
CCGW09T308FST	CCGW3252FST	9,53	3/8	9,67	.381	0,8	1/32

3.4. ábra CCGW09T304FST KD1425 váltólapka adatai (forrás: www.productivity.com, 2021)

A készsár kinyúlása a késtartóból 50 mm volt a rezgésmérő berendezés felhelyezése miatt (lásd a következő fejezetben).

3.1.4. Erőmérés módszere

Az esztergálási erőméréseket palástesztergálás közben végeztem, hűtő-kenő közeg használata nélkül. A korábban bemutatott munkadarab négy szakaszán különböző előtolás értékeket állítottam be. Az első szakaszon (a munkadarab tokmánytól távolabbi vége felől) 0,1 mm/ford., a második szakaszon 0,15 mm/ford., a harmadikon 0,2 mm/ford., a negyediken pedig 0,25 mm/ford. előtolás értékeket állítottam be.

A fogásmélység minden esetben 0,5 mm volt.

A tokmány fordulatszámát széles tartományban változtattam. A folyó forgács esetleges feltekeredése miatt, biztonsági okokból 1680 1/perc értékben maximalizáltam a fordulatszámot,

míg a legkisebb fordulat 780 1/perc, hiszen polimer munkadarab esetén, az általam használt átmérőtartományban ritkán használnak ilyen, vagy ettől kisebb fordulatszámot a megmunkálás gyakorlatában.

Szem előtt tartottam, hogy a forgácsoló sebességek 50-re kerekített egész értékek legyenek, hiszen a szerszámkatalógusokban is rendszerint ilyen módon határozzák meg az egyes szerszámokhoz tartozó ajánlott intervallumot. Esztergálás során anyagleválasztás történik, így a kezdeti átmérő folyamatosan csökken. Az átmérő csökkenésével a forgácsoló sebesség is csökken, ha a fordulatszámot nem változtatom. Ezek alapján a méréseim között a fordulatszám és az átmérő értékek folyamatosan változtak. A 3.1. táblázat foglalja össze az esztergálási vizsgálataim bemeneti paramétereit:

3.1. táblázat Fordulatszámra vonatkozó paraméterek

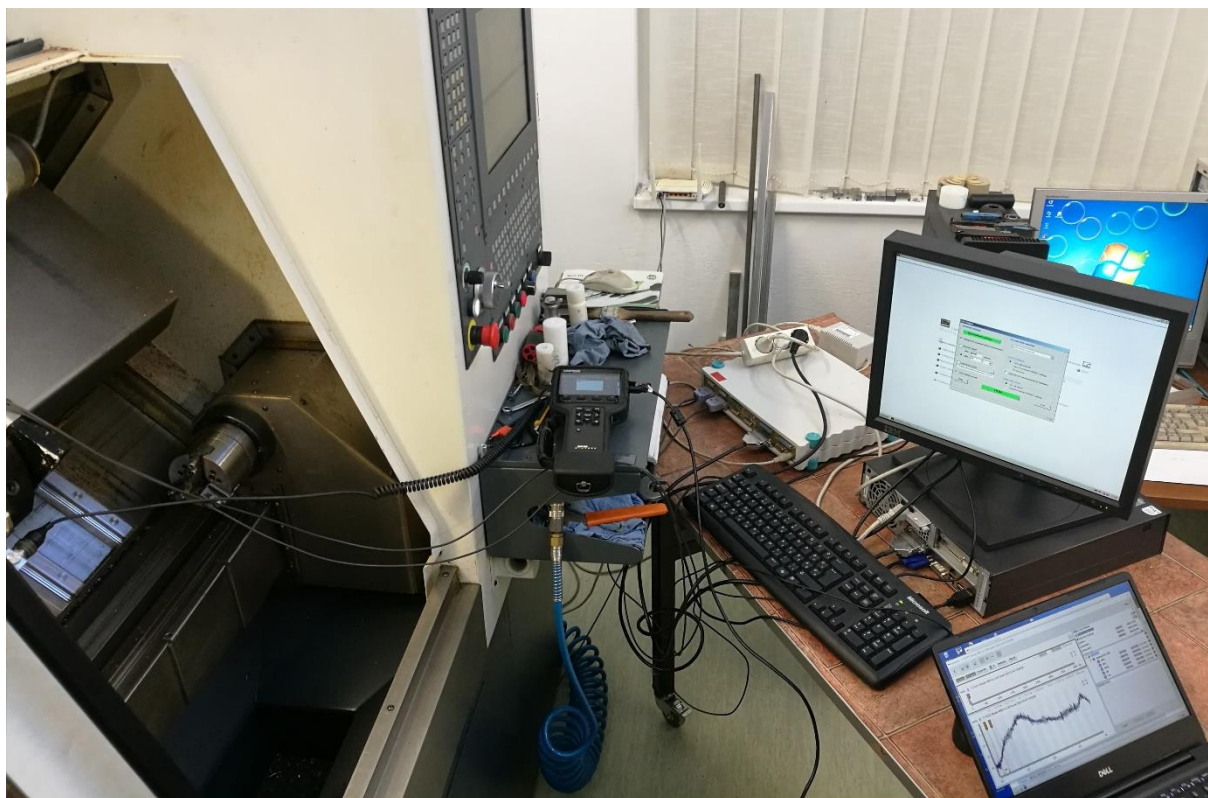
Indítások száma	Fogásmélység [mm]	Kezdeti átmérő [mm]	Fordulatszám (1/perc)	Forgácsoló sebesség (m/perc)
1	0,5	76,8	1680	400
2		74,68	1080	250
3		70,2	1380	300
4		67,32	1680	350
5		62,2	780	150
6		59,95	1080	200
7		58,67	1380	250
8		48,37	1680	250
9		47,13	1380	200
10		45,21	1080	150
11		41,8	780	100
12		38,9	1680	200

Ahhoz, hogy a kívánt kezdeti átmérőn indítsam a méréseket, az Ø80 mm-es munkadarabból le kellett esztergálni. Ezeket az esztergálásokat már a CNC gépen végeztem. Az adott program tartalmazta a palásttisztázást minden egyes mérés előtt.

Látható, hogy 12 indítás szerepel a táblázatban. Ezt úgy kell értelmezni, hogy minden indításhoz 4 különböző mérés tartozik, hiszen a 80 mm mérési hosszt 4 szakaszra bontottam, más előtolás értékekkel. Így egy munkadarabon 48 forgácsolási erőmérést végeztem.

Méréseimet minden anyagtípuson 3 alkalommal végeztem el, új munkadarabokkal. 3 fajta anyagon, összesen 3 ismétléssel, 12 indítással, 4 szakaszon összesen 432 mérési adathalmazt kaptam.

A nyúlásmérő bélyegek vezeték segítségével csatlakoztak a Spider 8 típusú mérőerősítőhöz, amely összeköttetésben állt egy számítógéppel (3.5. ábra). Így a mérést valós időben monitorozhattam, valamint elmenthettem a kapott adatokat későbbi feldolgozás céljából.



3.5. ábra Az esztergálási vizsgálatok környezete

Az adatok feldolgozásához és mentéséhez a Catman nevű szoftvert használtam. A mérési frekvencia minden esetben 50 Hz volt. Az adatsorok mentése a számítógépre a szoftver saját formátumában történt, melyeket a Microsoft Excel nevű szoftver képes kezelni. Az adatok feldolgozását szintén Excel-ben végeztem.

3.1.5. Rezgésmérés módszere

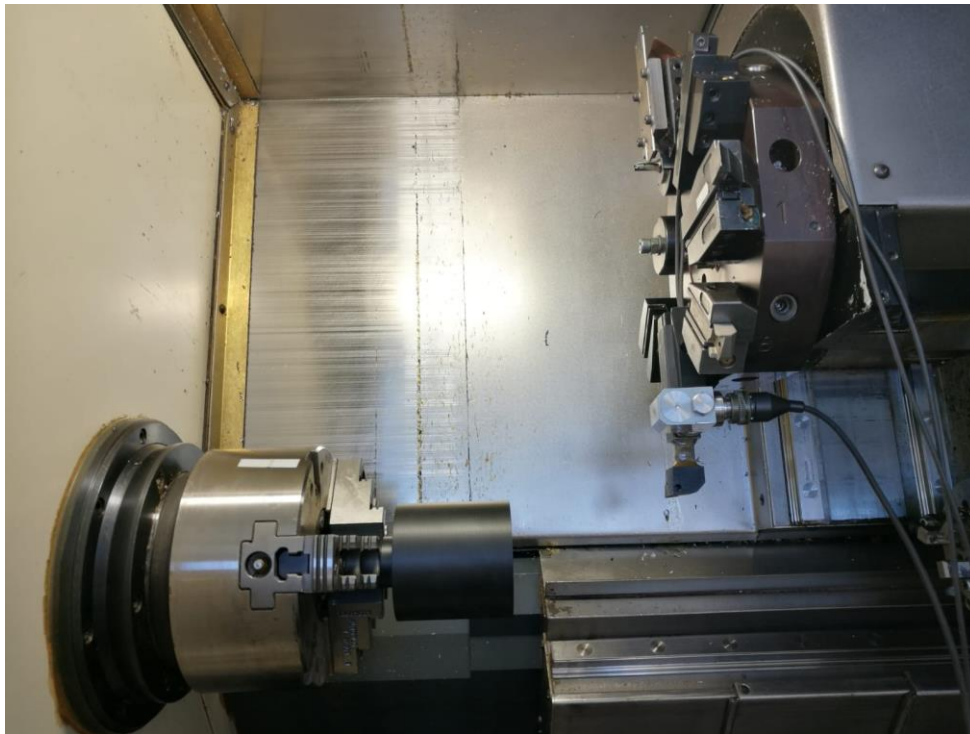
A rezgésmérési vizsgálatokat az erőméréssel egy időben végeztem. A mérés eszközeit (SPM Magyarország Kft.) mutatja a 3.6. ábra.



3.6. ábra A rezgésmérés eszközei

Balra a Leonova Diamond DIA-300 típusú adatgyűjtő egység látható. Ehhez az eszközhöz csatlakoznak a mérésben résztvevő egyéb eszközök vezetékkel vagy WiFi-n keresztül. Balról a második egy SLD-144S típusú rezgésmérő egység, mely egy erős mágnes segítségével csatlakozik a mérni kívánt gépelemhez. Az eszköz mérési tartománya 0-10 kHz. Balról a második egy ütésimpulzus mérő, balra pedig egy TTP10 típusú lézeres fordulatszám mérő eszköz látható.

A szerszám és a munkadarab közti rezgés közvetlen mérése nem lehetséges, így az ehhez legközelebbi nem forgó elemem helyeztem el a rezgésmérő eszközt, amely a késszár (3.7. ábra). A késszár kinyúlását ehhez növelni kellett. 50 mm késkinyúlás mellett az eszköz biztonságosan felhelyezhetőnek bizonyult.



3.7. ábra SLD-144S típusú rezgésmérő elhelyezése a késszáron

A fordulatszám mérése, azaz jelen esetben a tokmány pontos pozíciója elengedhetetlen a rezgésmérés folyamatánál. Ennek érdekében a tokmányra egy vékony fényvisszaverő szalagot helyeztem el (3.8. ábra). A forgó tokmányon lévő szalag így visszaveri a lézeres fordulatszám mérő eszközhöz a lézerfényt, így a mért adatok és a tokmány pozíciója mindig szinkronban maradnak.



3.8. ábra Fényvisszaverő szalag a tokmányon

A méréseknek két fázisa volt, először a CNC programot elindítva a szerszámmozgást megállítottam, majd megmértem a tokány fordulatszámát. A szerszámmozgást elindítva továbbra is szükséges volt a folyamatos fordulatszám mérés. Amikor a szerszám a munkadarabra hatolt, elindítottam a rezgésmérést. A rezgésmérésnek mindig volt egy minimális időszükséglete, melyet 1,6 másodpercre állítottam. Ez az érték elegendőnek bizonyult a mérések sikerességét illetően. Az időkorlát kritikus, hiszen 0,25 mm/fordulat előtoló sebességen 1680 1/perc főorsófordulat mellett a 20 mm mérési távolság nagyon rövid idő alatt bejárható. Ha a mérés még nem fejeződik be, viszont a szerszám már nem forgácsol, akkor a mérési értékek értelmezhetetlenné válnak.

A próbamérésekből kiderült, hogy az ütésimpulzus mérését el kell hagynom. Ennek egyik oka, hogy ez egy harmadik fázis lenne, amire egyszerűen nem marad idő, másik oka, hogy mivel az eszközt neki kell szorítani a készárnak, ez a szorítás során fellépő erő befolyásolta a rezgésmérések pontosságát.

A mérések során az adatok a Leonova Diamond DIA-300 eszköz ideiglenes memóriájában kerültek tárolásra, azokat biztonsági okokból néhány mérésenként az eszköz végleges tárhelyére mentettem. A mérések végeztével az eszközt egy számítógépére csatlakoztattam, majd az adatokat átmásoltam. Az eredmények a Condmaster Ruby nevű szoftverrel váltak elérhetővé és feldolgozhatóvá. Egyéb szoftver nem kezeli ezt a típusú fájlformátumot.

3.1.6. Felületi érdesség mérési módszere

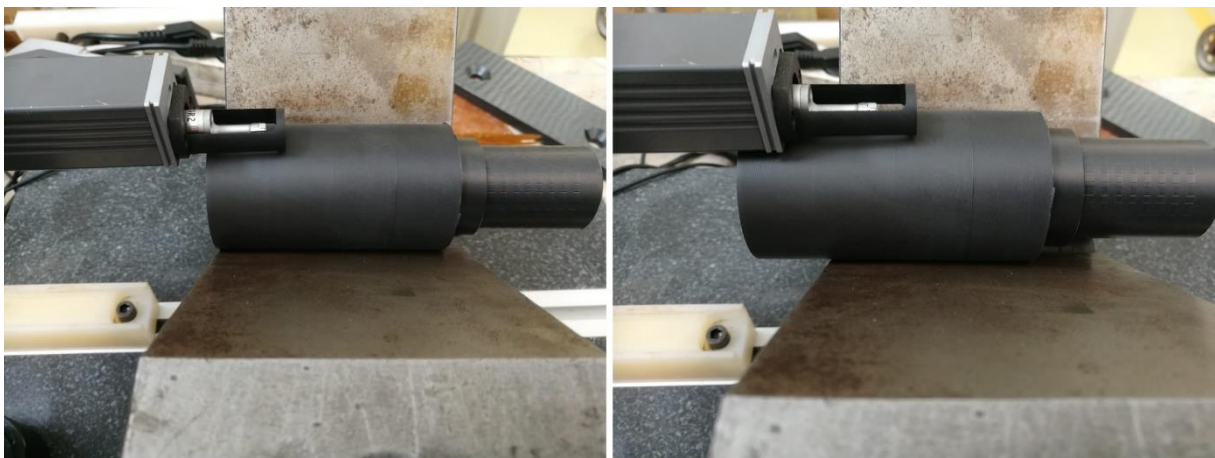
Megmunkálás során az egyik legfontosabb kimeneti paraméter a megmunkált felület felületi érdessége. A kétdimenziós felületi érdesség legfontosabb jellemzői és mérőszámai bemutatásra kerültek a 2.4.1. fejezetben.

A forgácsoló vizsgálataim közben vizsgáltam az esztergált felületek kétdimenziós érdességjellemzőit. Ezt minden mérési sorozat után megtettem a négy mérési szakaszon külön.

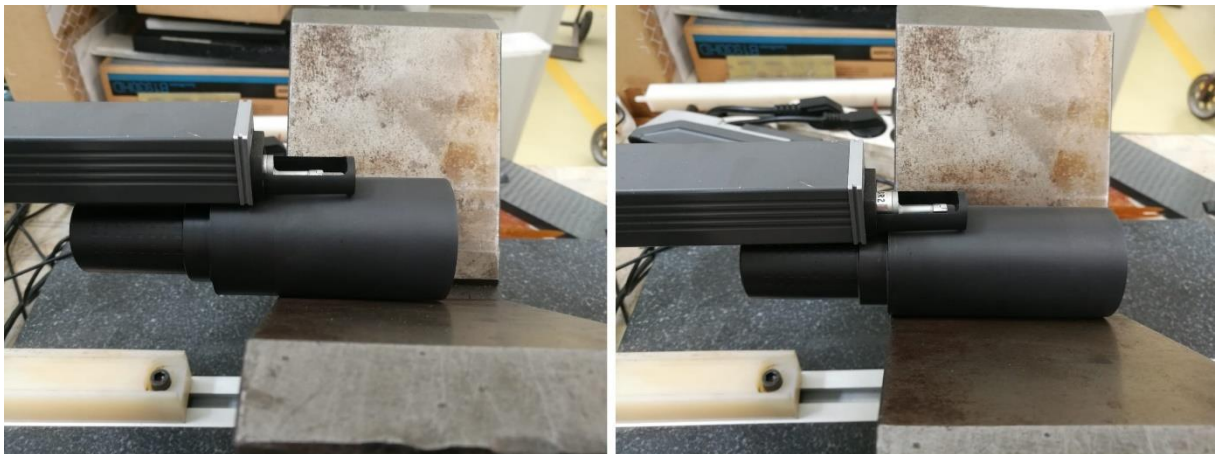
A vizsgálatokhoz az intézet tanműhelyében található Mitutoyo SurfTest SPJ-201 típusú érdességmérő berendezést használtam, ami szintén egy Mitutoyo gyártmányú oszlopos mérőállványon foglal helyet.

A mérési beállításokat az ISO 1997 szabványnak megfelelően állítottam be. A mérési hossz 8 mm volt, 2,5 mm véglevágással. R profilt mértem, 2CR75 szűrési beállítások mellett. A mérések kimeneti paraméterei a R_a , R_z és R_q érdességjellemzők, ahol R_a az átlagos felületi érdesség, R_z az egyenetlenség magasság, R_q pedig a simasági mérőszám.

A tokmányból kivéve a munkadarabot egy robosztus prizmára helyeztem. A mérések folyamatát a 3.9. ábra és a 3.10. ábra szemlélteti. A prizmán a munkadarab a mérések során metastabilis állapotban volt elhelyezve. A munkadarab forgatását a 2. szakasz mérése után a munkadarab geometriája indokolta, mivel a mérés során nem volt rögzítve a prizmához. A mérési módszer eredményes volt.



3.9. ábra Az 1. (balra) és a 2. (jobbra) mérési szakasz felületi érdességének mérése



3.10. ábra A 3. (balra) és a 4. (jobbra) mérési szakasz felületi érdességének mérése

Az érdességmérő berendezés vezérlője vezetéken keresztül továbbította az adatokat egy számítógépbe. Az eredmények feldolgozását a Microsoft Excel nevű szoftverben végeztem, továbbá szintén ezzel a szoftverrel minden mérésről jegyzőkönyvet készítettem.

Fontos megjegyezni, hogy az esztergálási vizsgálatok pontosságát nem befolyásolta negatívan a munkadarab tokmányból való ki- majd visszafogása, hiszen minden mérés előtt egy (vagy több) palásttisztázó fogást tartalmaztak a CNC programok.

3.2. A kontakt zóna mérési módszere

Egy tribológiai vizsgálat esetén az egyik legmeghatározóbb bemeneti tényező az érintkező felületek nagysága. Erre irányuló kutatások fellelhetők a szakirodalomban, de kizárólag fém munkadarabok esetén foglalkoztak a kontakt zóna vizsgálatával. Több matematikai modell létezik, viszont ezek esetenként egymástól szignifikánsan eltérőek. Az említett okok miatt nem használtam a korábban felállított modelleket.

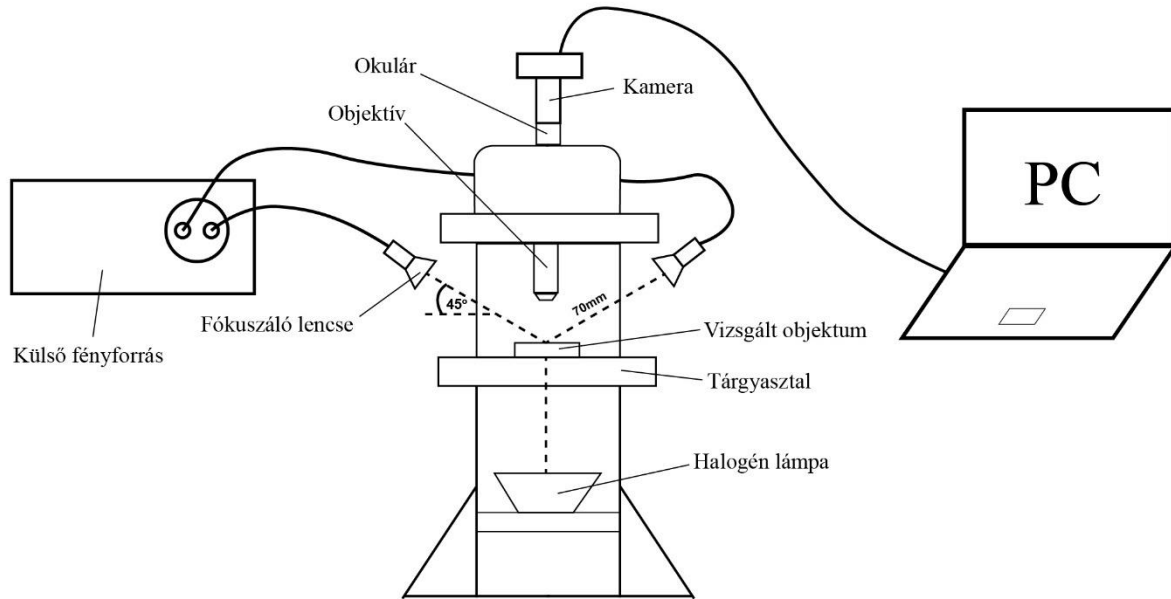
A tribológiai kontakt zóna nagyságán disszertációmban a munkadarabról levált forgács és a szerszám homloklapfelületének közös érintkező felületét értem.

Esztergálás során a kontakt zóna nagyságát kiszámítani rendkívül bonyolult, hiszen pontos adatok szükségesek a munkadarab anyagtulajdonságait illetően, valamint bonyolult mechanikai, hőtani és áramlástani számítások igényelne, amely egy önálló kutatási téma szintjét is eléri. Mivel ez az adat kutatásom szempontjából elengedhetetlen, így egy elfogadott módszert alkalmaztam, a kontakt zóna, azaz az érintkezési felület meghatározása érdekében, a kép alapú területmeghatározást.

Az ehhez szükséges kiegészítő méréseket egy hagyományos E 400 típusú esztergagépen végeztem. A fogásmélység minden esetben 0,5 mm, a főorsó fordulatszáma pedig 530 1/perc volt. Az előtolás nagyságát 0,1; 0,2; 0,4 és 0,6 mm/fordulat értékekre választottam. A munkadarab anyaga, valamint a szerszám anyaga és geometriája kulcsfontosságú, hiszen bármilyen eltérés a korábbi esztergálási méréseimtől a kontakt zóna mérésének pontosságát befolyásolná, ezért ennél a vizsgálatnál is a korábban említett három munkadarab-anyaggal dolgoztam, ugyanazt a váltólapka típust használva.

A mérések előtt az eszterga váltólapka homloklapfelületét alkohollal letisztítottam, majd befestettem. Először 0,1 mm/fordulat előtolással végeztem el a palástesztergálást egy nem meghatározott hosszúságú szakaszon. Ezután a lapkát eltávolítottam a szerszámszárból, majd egy száraz puha textillel óvatosan megtisztítottam, hogy a nagyon kicsi forgácsdarabok, továbbá szennyeződések ne befolyásolják a képkészítést. A lapkát ezután egy BMS 74290 típusú mikroszkóp tárgyasztalára helyeztem. Miután manuálisan beállítottam a fókuszot, a mikroszkóp BMS 764595 típusú digitális kamerájának segítségével elkészítettem a képet. A kamera egy számítógéphez volt csatlakoztatva USB porton keresztül vezetékkel. A képkészítést, majd mentést a ScopePhoto 3.1.615 verziójú szoftverrel készítettem. A méréseim elvi vázlatát a 3.11. ábra szemlélteti.

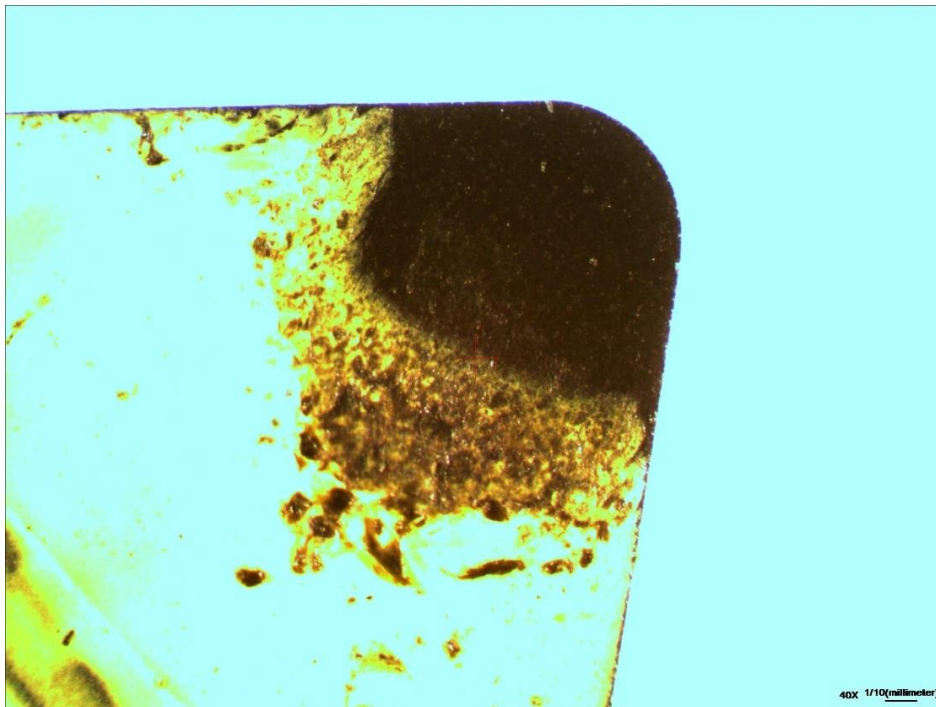
A lapkát egy tiszta, fehér színű papírlapra helyeztem, hogy a mikroszkóp által alkotott kép sötét háttere ne legyen zavaró. A lapka megvilágítása alulról a kontraszt miatt volt szükséges. Erre a mikroszkóp beépített 20 W (6 V feszültségen) teljesítményű halogén lámpáját használtam. Külső megvilágítást is alkalmaztam, amit egy KL 1500 electronic típusú mikroszkóplámpa biztosított az ábrán látható módon. A fókuszáló lencsék 45 °-ban voltak elhelyezve 70 mm távolságra a lapkától. Nagyításra a mikroszkóp 4X nagyítást biztosító objektívét használtam, így a kamera 10X nagyító tulajdonságával együtt összesen 40X nagyítással alkotott képet láthattam a számítógép monitorán. A 2048x1536 felbontású képeket a fent említett szoftver segítségével mentettem el JPEG. formátumban.



3.11. ábra Kontakt zóna mérésének elvi vázlata

A kép elkészítése után a lapkát alkohollal megtisztítottam, megtöröltem, újrafestettem és visszahelyeztem a késszárba. Ezután újra felvettem a nullpontot a palástfelületen, így készen állt a következő mérés.

Egy elkészített képet mutat a 3.12. ábra a festett lapkáról. Az ábra PA 66 GF30 munkadarab esetén 0,6 mm/fordulat előtolás, 30 mm átmérő és 530 fordulat/perc fordulatszámú való esztergálás utáni állapotot ábrázol.



3.12. ábra Egy kép alapú területmeghatározás céljából készített kép

Minden mérést összesen 8 alkalommal végeztem el, mindhárom anyagra, minden előtolás értékre 4 képet készítettem, így összesen 96 képet készítettem.

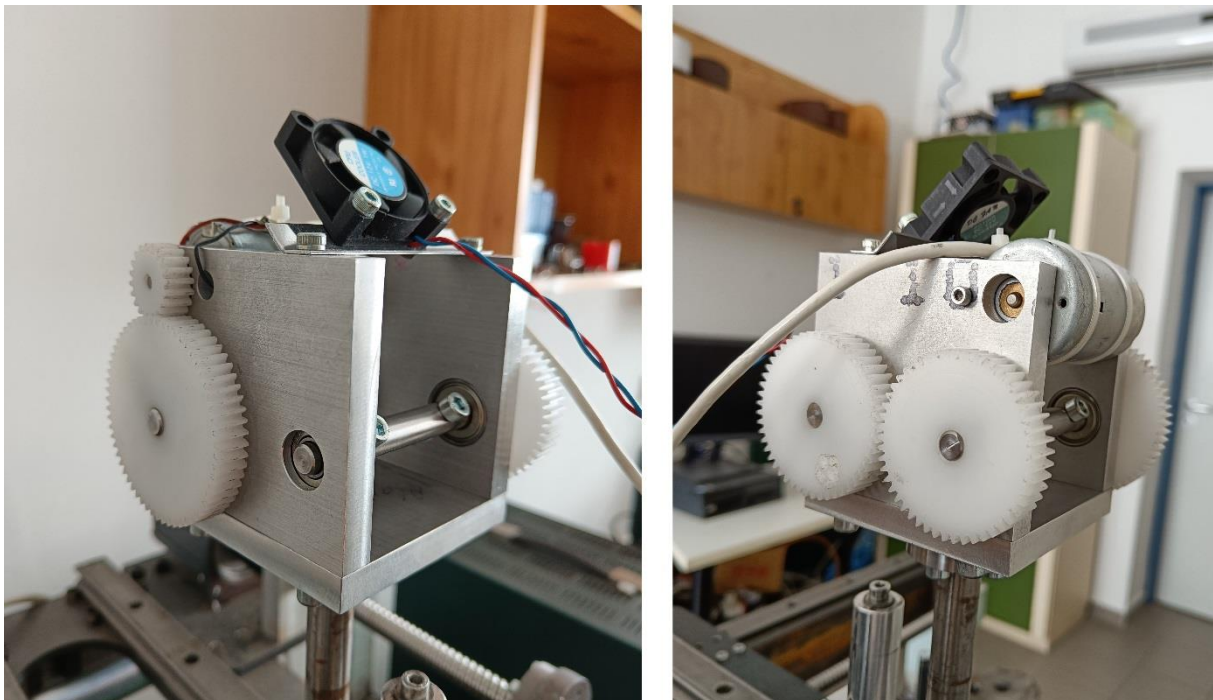
A képeket úgy készítettem, hogy vízjelként tartalmazták a nagyítás mértékét és egy 0,1 mm hosszúságú vonalat, mint skálát. Kép alapú területmeghatározásra az Adobe Photoshop CC 2018 nevű szoftvert használtam. A képeket nem módosítottam, csak területkijelölésre és területszámításra használtam a szoftvert. A skála segítségével 71 px/0,1 mm arányt állítottam be. A megfelelő terület kijelöléséhez a 'Magic Wand' eszközt, a kijelölés esetleges korrigálásához pedig a 'Quick Selection' eszközt használtam a szoftveren belül.

3.3. Tribológiai vizsgálatok

Tribológiai vizsgálataimat a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézetének gödöllői tanműhelyének tribológiai laboratóriumában végeztem. A tribológiai vizsgálatok közül a Pin-on-Disc (azaz „tű a tárcsán”) típusú modellvizsgálati módszert választottam, mert ennél a vizsgálati típusnál folyamatos csúszó súrlódás közben mérhetők a kimeneti tribológiai jellemzők. A vizsgáló berendezés bemeneti paraméterei a munkadarab és a próbatest anyaga, a csúszás sebessége és pályája (állandó, vagy változó pálya), a csúszási pálya sugara, a csúszás sebessége, az ellendarabra (disc, azaz tárcsa) merőlegesen ható normálerő (továbbiakban: normál erő, F_N), illetve igény szerint a kenőanyag minősége.

Palástesztergálás közben a munkadarabról levált forgács és a szerszám homloklapja között szintén folyamatos csúszási súrlódás van jelen, ezért a Pin-on-Disc típusú vizsgálati módszert tartottam a tribológiai modellvizsgálatok közül a legcélszerűbbnek.

Vizsgálataimat kiegészítettem további egy bemeneti paraméterrel, melyet egy ún. vibrációs egység szolgáltatott (3.13. ábra)



3.13. ábra Vibrációs egység

3.3.1. Vibrációs egység bemutatása

A vibrációs egységben (3.13. ábra) egy 12V villanymotor foglal helyet, mely fogaskerék áttételen keresztül meghajt egy tengelyt. A tengely túlsó végén található egy másik fogaskerék, mely szintén fogaskerék kapcsolattal meghajt egy másik tengelyt. A fogaskerek áttétele

ebben az esetben 1:1, így azonos sebességgel forognak, ellenkező irányban. A tengelyekre csavarkötés segítségével tömegek szerelhetők (tengelyenként 2 darab). Az így egymással szembe forgó 2-2 tömeg által keltett erőhatások oldalirányban kioltják egymást és csak a tárcsára merőleges erők hatnak a rendszerre, így a statikus (tárcsára normál irányú) erőhöz viszonyítva egy lengő erőt biztosítva. Fontos szempont, hogy a tribológiai rendszerre ható normál erők összességében lüktető erők legyenek, máskülönben a próbatest a vibrációs egység tengelyeinek minden fordulatanál egyszer elemelkedne a tárcsáról, azaz pattogna rajta. Ezt a jelenséget nem vizsgáltam, mert ez az eset nem kapcsolódik a kutatásom témájához.

A vibrációs egység villanymotorjának fordulatszámát a villanymotort ellátó tápegység kimeneti feszültségének szabályozásával változtattam 6 V, 8 V, 10 V és 12 V között, melyekhez tartozó frekvenciaértékek rendre 13 Hz, 18 Hz, 23 Hz és 28 Hz, amplitúdóértékek pedig rendre 0,23 N, 0,53 N, 0,8 N és 1,2 N. Az amplitúdó értékek a 3.15 ábra felső részénél látható $F_{dinamikus}$. F_N két erőkomponensből áll tehát:

$$F_N = F_{statikus} + F_{dinamikus} [N]$$

A statikus komponens a rendszerhez adott statikus tömegek, illetve a szerkezet saját tömege, a dinamikus komponenst pedig maga a vibrációs egység szolgáltatja.

Annak érdekében, hogy a vibrációs egység tartós üzeme biztosított legyen, egy PC ventilátor került felhelyezésre, mely a villanymotort hűti.

A villanymotor és az első hajtott tengely közötti áttételt úgy alakítottam, hogy épp az esztergálási vizsgálataim során beállított főorsó-fordulatszámok legyenek beállíthatók.

3.3.2. Tribológiai vizsgálatok próbatestei és módszere

Tribológiai vizsgálataimnál a „pin” anyaga minden esetben a vizsgált polimerek valamelyike volt. A próbatest alapjául, fizika méreteit tekintve egy 20 mm hosszú henger szolgált. A henger, azaz a „pin” átmérője a bemeneti paramétereknek megfelelően lett legyártva (lásd: 3.2. táblázat).

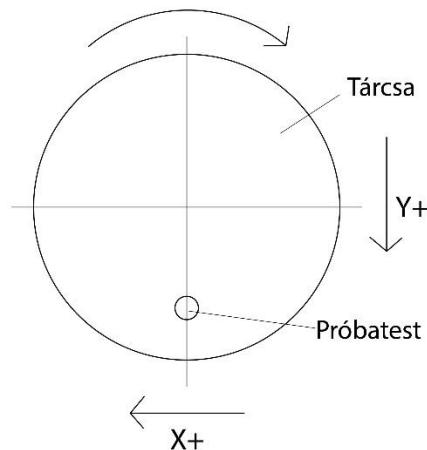
A tárcsa, azaz „disc” anyaga HC (Hard Carbon) bevonatolt keményfém pogácsa, melynek vastagsága 10 mm, átmérője 100 mm. A tárcsa közepén található egy M6 technológiai furat, mely a méréseimet nem befolyásolta. Azért választottam HC bevonattal rendelkező tárcsát, mert ez a bevonat nagyban hasonlít a polikristályos gyémántra súrlódási és kopásállósági szempontból is. A bevonatoló cég állítása szerint a bevonat vékony, sima és nagy keménységű. Kifejezetten ajánlott szálerősítésű polimerek megmunkálására, ezen felül magas a hőstabilitása, kopásállósága, illetve tribológiai tulajdonságai is kiválóak. Szintén a bevonatoló cég szerint, a HC bevonat közelebb áll a polikristályos gyémánt tulajdonságaihoz, mint a DLC (Diamond Like Carbon, azaz „hamisgyémánt”) bevonat. A műszaki gyakorlatban is gyakran használnak HC bevonatot szerszámok élettartamának növelésére, valamint a súrlódási tulajdonságok javítására.

A tárcsa anyaga fontos volt kutatásom szempontjából, mert egy tribológiai rendszer egyik – ha nem legfontosabb – paramétere az anyagpárosítás. Mivel forgácsolási vizsgálataimat polimer munkadarabokkal és gyémánt bevonatú szerszámmal végeztem, így a legcélszerűbb lett volna, ha tribológiai vizsgálataim is ezeket az anyagpárosításokat tartalmazzák. Ennek azonban technológiai és anyagi határai voltak. Áthidaló megoldásként ajánlották a HC bevonatot (www.oerlikon.com, 2021).

A tárcsa felületi érdességét minden mérés előtt megmértem. Az átlagos felületi érdesség értékek (R_a) minden esetben 0,15 – 0,18 μm voltak.

Tribológiai vizsgálataim során a Spider 8 típusú mérőerősítőt és a Catman nevű szoftvert alkalmaztam az adatok gyűjtésére és valós idejű monitorozására.

Vizsgálataim kimeneti paraméterei a súrlódási erő (F_s), illetve a próbatest palástfelületén mért hőmérséklet voltak. A súrlódási erőt két irányban mértem (F_{sx} és F_{sy}). A 3.14. ábra mutatja a két erőkomponenst a tribológiai rendszerben.



3.14. ábra Súrlódási erőkomponensek irányainak magyarázata

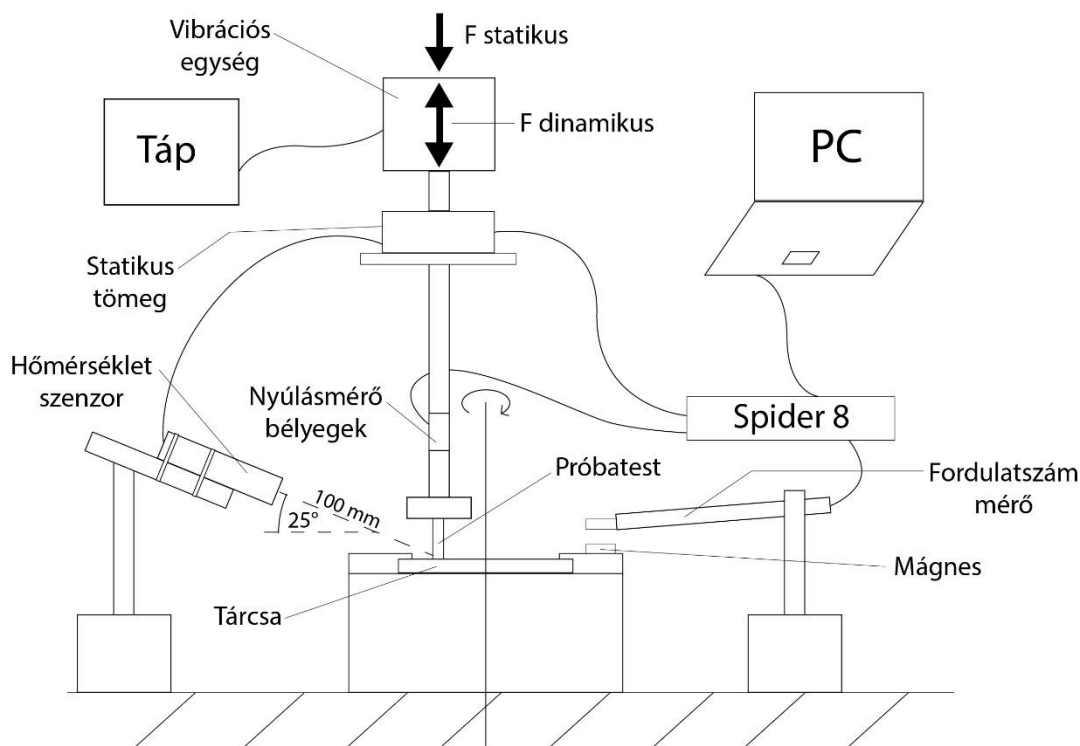
F_s kiszámítását Pitagorasz-tétellel végeztem:

$$\sqrt{F_{sx}^2 + F_{sy}^2} = F_s [N]$$

Vizsgálataim másik fontos számított kimeneti paramétere a súrlódási tényező (Jele: μ , mértékegység nélküli szám). A súrlódási tényezőt a jól ismert összefüggéssel számítottam ki:

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} [-]$$

A súrlódási rendszerek egyik fontos befolyásoló tényezője a hőmérséklet. Mivel a hőmérsékletet a kontakt zónában mérni nem lehet, így annak közelében mértem. A 3.15. ábra mutatja a tribológiai mérőrendszerem elvi felépítését. A PCCFMT-0-3M típusú hőmérsékletmérő szenzor a próbatest palástfelületén mérte a hőmérsékletet, a kontakt zónától számított 2 mm magasságban. A szenzor pontossága $\pm 1\%$, vagy $\pm 1^\circ\text{C}$ (amelyik nagyobb), illetve fix fókusztávolsággal rendelkezik, mely 100 mm. Ezen a fókuszon a látómezője 5 mm átmérőjű. A triboteszter geometriai adottságai miatt a szenzor betekintési szögét 25° értékre választottam. A lencse és a próbatest távolságát 100 mm-re állítottam egy kifejezetten erre készített speciális 3D nyomtatott távtartóval.



3.15. ábra Tribológiai vizsgálataim elvi felépítése

Csak úgy, mint a forgácsolási vizsgálataim esetén, ebben az esetben is a Spider 8 mérőerősítőt használtam (részletes leírás az „Erőmérés módszere” című fejezetben). A módszer annyiban tér el, hogy tribológiai vizsgálataimnál a mérési frekvenciát 5 Hz értékre állítottam. A mérések hosszát 1,5 órára választottam, mert úgy tapasztaltam, hogy ebben az esetben már jól láthatók a kezdeti szakasz és a közel állandósult szakasz közti különbségek. Egyes esetekben az eszközök állapotának megőrzése érdekében a mérést korábban leállítottam.

Minden vizsgálat előtt újramunkáltam a próbatest érintkező felületeit, valamint letisztítottam azt. A tárcsát nem volt lehetőségem újraköszörölni, a bevonat miatt, de a felületét szintén minden esetben zsírtalanítottam és tisztítottam. Szemmel látható felületi sérülést vagy elváltozást nem tapasztaltam egyik mérés után sem.

A szenzorok mérési alaphelyzetének beállítása után elindítottam a mérést, majd a tárcsa forgó mozgását. Ezután óvatosan ráengedtem a triboteszter függőleges oszlopát a tárcsára.

Fontos megjegyezni, hogy az első néhány mérési pont nem releváns, mivel a ráengedés nem előre meghatározott és kontrollált volt, hiszen kézzel történt, ezért ebben a kezdeti időszakban (körülbelül 1 másodperc) az F_N értékek meghatározhatatlanságuk miatt nem relevánsak.

Tribológiai vizsgálataim környezeti körülményeit az ASTM G99 szabványnak megfelelően biztosítottam.

3.3.3. p_v érték meghatározása

A DIN 50322 szabvány IV vizsgálati kategóriája a laboratóriumban végezhető modellvizsgálat. Ez a vizsgálati fajta azért fontos, mert így nem szükséges megteremteni a valós körülményeket,

illetve kontrollált környezetben végezhető a mérések, melyekből következtethetünk a valós körülményekre.

A valós körülmények többek között a bemeneti paramétereket jelentik. A gyakorlatban e paraméterek nagysága nagyságrendekkel eltérhetnek a laboratóriumban beállítható paraméterek nagyságától. Esetemben szintén ez állt fenn.

Esztergálási vizsgálataimnál a forgácsoló sebesség viszonylag nagy volt, ezt az értéket a tribológiai vizsgáló berendezésen elérni nem lehet. Épp ezért kerestem egy olyan jellemző paramétert, mely magába foglalja a csúszási sebességet, mely minden esetben fontos paraméter egy csúszó-súrlódó rendszerben. Az így kiválasztott paraméter a p_v (felületi nyomás és csúszási sebesség szorzata) érték, mely a súrlódó rendszerek egyik legfontosabb jellemzője.

Mivel a p_v értékben szintén nagy jelentősége van a sebességnek, így az esztergálási vizsgálataim során kapott értékekből számított p_v értékek 250-ed részét állítottam be (továbbiakban: csökkentett p_v érték) a tribológiai vizsgálataim bemeneti paramétereiként. Az arány azért 250, mert ezzel az aránnyal az esztergálási vizsgálataimnál számított legkisebb és a legnagyobb p_v értéket is el tudtam érni a „ p_{in} ” átmérőjének és az F_N értékének változtatásával. Mivel korábbi vizsgálataim bizonyították, hogy a sebességnek nincs szignifikáns hatása, így ezt az értéket állandónak vettem.

Az 3.2. táblázat tartalmazza a csökkentett p_v értékre vonatkozó információkat.

3.2. táblázat Tribológiai vizsgálatok bemeneti paraméterei

Anyag	p_v szint	p_v érték [MPa·m/s]	Csökkentett/beállított p_v érték [MPa·m/s]	p_{in} átmérő [mm]	F_N [N]	Frekvencia [Hz]
PA 6 E	5	320,45	1,28/1,28	5	26±1,2	28
	4	248,55	0,99/0,98	5	20±1,2	28
	3	172,56	0,69/0,68	6	20±1,2	28
	2	119,61	0,48/0,48	8	25±0,23	13
	1	72,48	0,29/0,28	10	23±0,23	13
PA 66 GF30	5	504,22	2,02/2,01	5	41±0,23	13
	4	385,62	1,54/1,52	5	31±0,8	23
	3	270,18	1,08/1,08	5	22±0,8	23
	2	191,96	0,77/0,75	6	22±0,23	13
	1	106,96	0,43/0,42	8	22±0,23	13
PA 6G-H ELS	5	316,45	1,27/1,28	5	26±1,2	28
	4	256,12	1,02/1,03	5	21±0,8	23
	3	190,26	0,76/0,75	6,5	26±1,2	28
	2	126,27	0,51/0,50	8	26±0,53	18
	1	75,29	0,30/0,31	10	25±0,23	13

A táblázatban szereplő csökkentett p_v értéket nem minden esetben sikerült pontosan beállítanom, szem előtt tartva azt, hogy az F_N értékek és a próbatest átmérőjének értékei egész számok legyenek. Egy esetet kivéve ezt sikerült tartanom. Látható azonban, hogy a csökkentett,

és a ténylegesen beállított pv értékek század pontosságra véve közel azonosak, így ezeket a beállított értékeket megfelelőnek ítéltam.

A csúszási sebesség értéke a berendezés maximális értékének megfelelő 230 l/perc volt. Azért a maximális értéket választottam, mert ha nem így tettem volna, a csökkentett pv értékeket csak egy nagyobb (250-nél) konstans osztóval tudtam volna elérni.

Vizsgálataim során nem használtam kenőanyagot, a külső hőmérséklet 24 °C volt, amelyet légkondicionáló berendezés biztosított. A relatív páratartalom 40-45 % volt.

Bizonyos méréseimnél nem vártam eleget ahhoz, hogy a rendszer átvegye a külső hőmérsékletet (lehűljön), ezért a hőmérséklet kezdő értékei bizonyos esetekben némileg magasabbról indulnak.

A mérések végeztével az adatok feldolgozását és a diagramok készítését Excel-ben végeztem.

3.3.4. Függvényillesztés és a regressziós vizsgálatok módszere

Ahogy az előző fejezetben említettem, tribológiai vizsgálataim során diagramokat készítettem, melyek a súrlódási tényező- és a hőmérséklet értékeket ábrázolja a megtett csúszási hossz függvényében. A későbbiekben a súrlódási tényező helyett a súrlódó erőket vizsgáltam.

A súrlódó erőt a súrlódási hossz függvényében vizsgáló diagramok esetén a diagramok instabil súrlódási szakaszait figyelmen kívül hagytam, melynek okát később ismertetem. A görbék stabil szakaszaira függvényt illesztettem. Függvényillesztéshez a MATLAB R2019b szoftver függvénykereső funkcióját használtam. A függvénycsalád kiválasztása a görbék szemrevételezéses vizsgálata alapján történt. A függvénycsalád kiválasztása és a program megírása után a szoftverbe betöltött adatok alapján a szoftverrel kiírtam a függvényben szereplő együtthatók értékét, valamint az R^2 értéket is, azaz a determinációs együtthatót, mely azt mutatja, hogy milyen pontossággal illeszkednek az adatok, a talált függvényre (ha $R^2 > 0,95$, akkor jó illeszkedésről beszélünk).

Az együtthatók értékeit anyagonként ábrázoltam diagramok formájában a hozzájuk tartozó pv érték függvényében, majd az így eredményül kapott diagramokat tovább vizsgáltam. A diagramok görbéi alapján sejthető volt, hogy milyen kapcsolat van az együtthatók és a pv érték között, de ezen összefüggések felírásához regressziós elemzéseket végeztem.

Az elemzések előtt adattisztítást hajtottam végre, ami azt jelenti, hogy a rendellenesen kiugró értékeket nem vettem figyelembe. Ez azért van, mert a sejtéseim alapján kétféle regressziós vizsgálatot végeztem, amelyek rendkívül érzékenyek a kiugró értékekre.

A regressziós vizsgálatokat az IBM SPSS, 27-es verziószámú matematikai statisztikai szoftverrel végeztem. A legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam, mert ez a legelterjedtebb módja annak, hogy függvényt illesszünk és összefüggést találjunk a mért adatok alapján.

Először minden esetben F-próbát alkalmaztam, hogy kiderüljön, hogy az illesztés releváns-e. Ennek eldöntésére a p érték szolgál. A vizsgálatok esetén amennyiben p érték kisebb, mint 0,05, úgy az analízis releváns, azaz a függvény különbözik a konstanstól, tehát van értelme regressziót vizsgálni.

Sejtéseim alapján lineáris-, illetve kvadratikus regressziós analízis futtattam le.

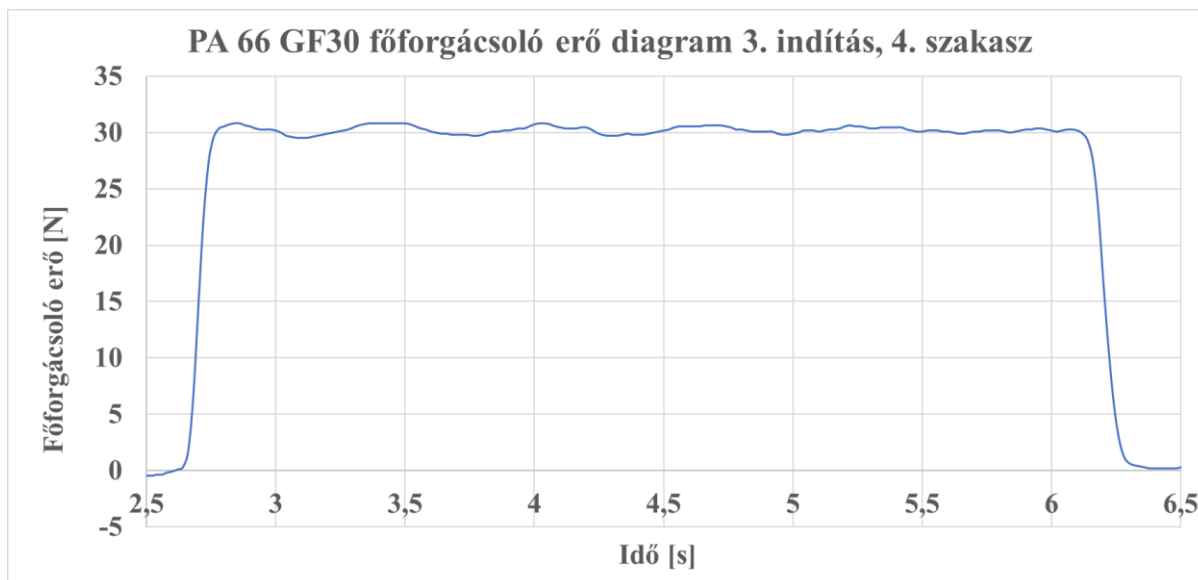
4. EREDMÉNYEK

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatómunkám során elért új, tudományos eredményeket.

4.1. Az erőmérés eredményei

A Spider 8 típusú mérőerősítőbe az esztérgálási erőmérések során több csatornán keresztül áramlottak az információk. Az egyik csatornán az idő, másikon a főforgácsoló erő, a harmadikon pedig az előtoló erő került rögzítésre. A mérési frekvenciát 50 Hz értékre állítottam be, így 0,02 másodpercenként nyertem információt a szerszámra ható pillanatnyi erőkről. A késszár mérte az előtoló erőket is (hármasként csatorna), viszont ezeket az eredményeket kutatásom során nem használom fel, kizárólag a főforgácsoló erőt veszem figyelembe.

Microsoft Excel-ben megnyitva az adatsort, kirajzoltattam az aktuális diagramot, mely a főforgácsoló erőt mutatja az idő függvényében. Egy ilyen diagramot ábrázol a 4.1. ábra. A mérési eredmények sokasága miatt nem ábrázolom az összes főforgácsoló erő mérési diagramját, viszont néhány további diagram megtekinthető az M5 mellékletben.



4.1. ábra PA 66 GF30 főforgácsoló erő diagramja (3. indítás, 4. szakasz)

A görbe nem a nulladik másodperctől indul, hiszen először elindítottam az erőmérést, majd ez után indítottam csak el a megmunkáló gépet. Jelen görbe jobb láthatósága érdekében nem ábrázolom a 2,5 másodperc előtti, illetve a 6,5 másodperc utáni erőértékeket, hiszen ezeken a szakaszokon nem ébred erő.

A mérési tartományban az erőgörbe csak ideális esetben lenne konstans. Az átlagerő kiszámításához éppen ezért az Excel 'ÁTLAGHATÓBB' függvényét használtam. A megfelelő peremfeltételek megadása után így minden főforgácsoló erő diagramból kiszámítottam az átlagos erőket.

Mivel összesen 9 munkadarabom volt (3-3 minden anyagból), így 9 táblázatot kaptam, melyeket anyagonként összevontam. Az összevont táblázatokat alább anyagonként szemléltetem. A szoftver pontosabb értékek kiszámítására is képes, azonban a két tizedes érték feletti pontosság jelen esetben gyakorlati szempontból elhanyagolható.

4. Eredmények

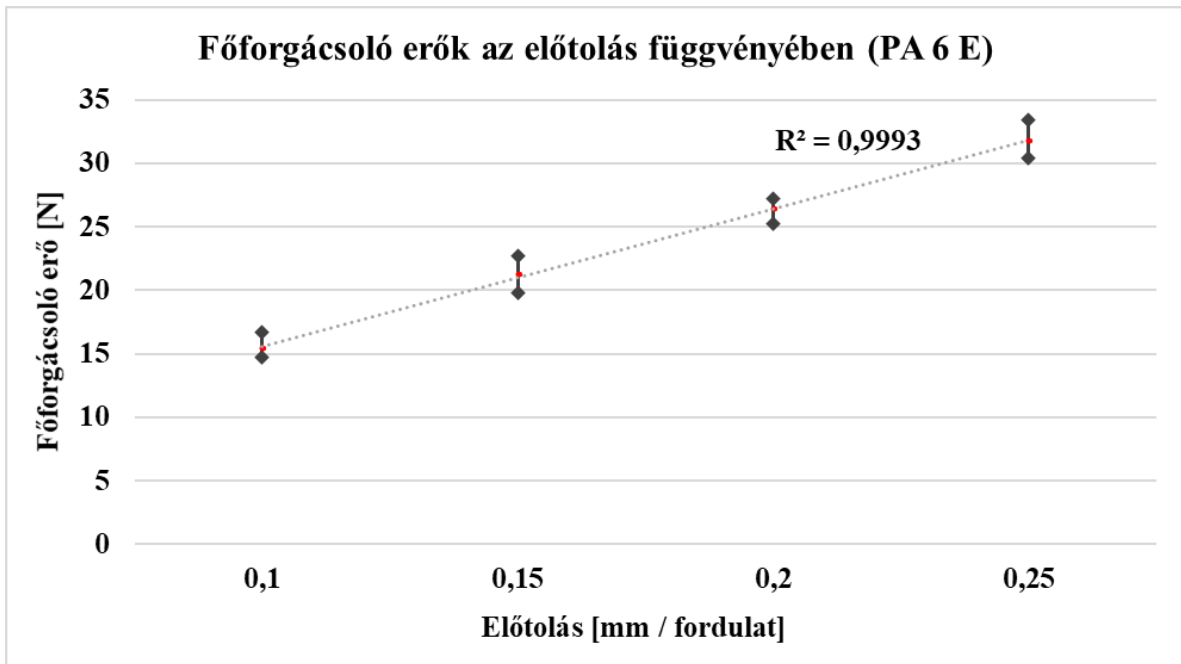
4.1.1. PA 6 E átlagos főforgácsoló erői

4.1. táblázat PA 6 E átlagos főforgácsoló erői

PA 6 E átlagos főforgácsoló erői												
1. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	17,20	14,74	15,45	14,61	16,46	15,17	16,89	14,70	14,91	15,12	17,39	15,34
0,15 [mm/ford]	21,46	20,23	22,52	22,05	20,47	22,80	22,67	22,51	20,73	20,97	21,26	23,24
0,2 [mm/ford]	24,88	25,71	25,92	25,45	25,80	28,48	28,23	25,24	28,57	26,88	26,98	26,63
0,25 [mm/ford]	29,16	30,93	31,73	31,72	31,12	34,10	31,63	30,61	31,95	34,02	32,22	33,87
2.md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	15,93	14,59	14,82	14,93	15,25	14,72	14,91	14,92	14,83	15,20	15,97	15,38
0,15 [mm/ford]	21,50	22,18	20,60	23,30	19,31	20,21	22,11	20,29	20,45	20,55	21,16	22,85
0,2 [mm/ford]	26,16	27,79	26,30	25,70	25,05	25,87	26,07	27,95	26,33	26,21	26,55	26,20
0,25 [mm/ford]	30,88	33,48	30,97	30,43	30,74	34,51	32,38	30,48	31,83	31,87	31,95	33,74
3.md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	14,94	14,74	15,34	15,08	16,13	15,11	14,71	15,20	15,07	15,64	16,79	15,50
0,15 [mm/ford]	20,04	20,74	20,78	20,87	19,70	20,58	21,39	20,05	20,79	21,44	20,59	22,15
0,2 [mm/ford]	25,55	26,26	25,79	25,59	24,83	26,03	26,35	26,92	26,68	26,51	26,28	26,30
0,25 [mm/ford]	31,62	31,54	31,36	30,19	31,22	31,67	31,38	30,09	32,16	32,07	31,58	31,85

A 4.1. táblázat néhány oszlopát a jobb átláthatóság kedvéért szürkére színeztem. Bal oldalon láthatók a PA 6 E anyagú munkadarabok (rövidítve: „md.”) sorszáma. Szintén bal oldalon a sorszám alatt az előtolás értékek láthatók mm/fordulat egységben. A munkadarabok sorszámai mellett (1-12) a CNC programok indításának sorszáma látható.

Az eredményeket grafikusán szemlélteti a 4.2. ábra.



4.2. ábra Főforgácsoló erők ábrázolása az előtolás függvényében PA 6 E esetén

A 4.2. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

$$F_f(f) = 108,43f + 4,7006 \text{ [N]}$$

Az ábrákon (4.2, 4.3 és 4.4 ábra) látható a főforgácsoló erő tartománya, illetve az értékek számtani közepei (piros jelölővel). A közepekre illesztett trendvonal lineáris, az R^2 szám mindhárom esetben 1-hez közeli.

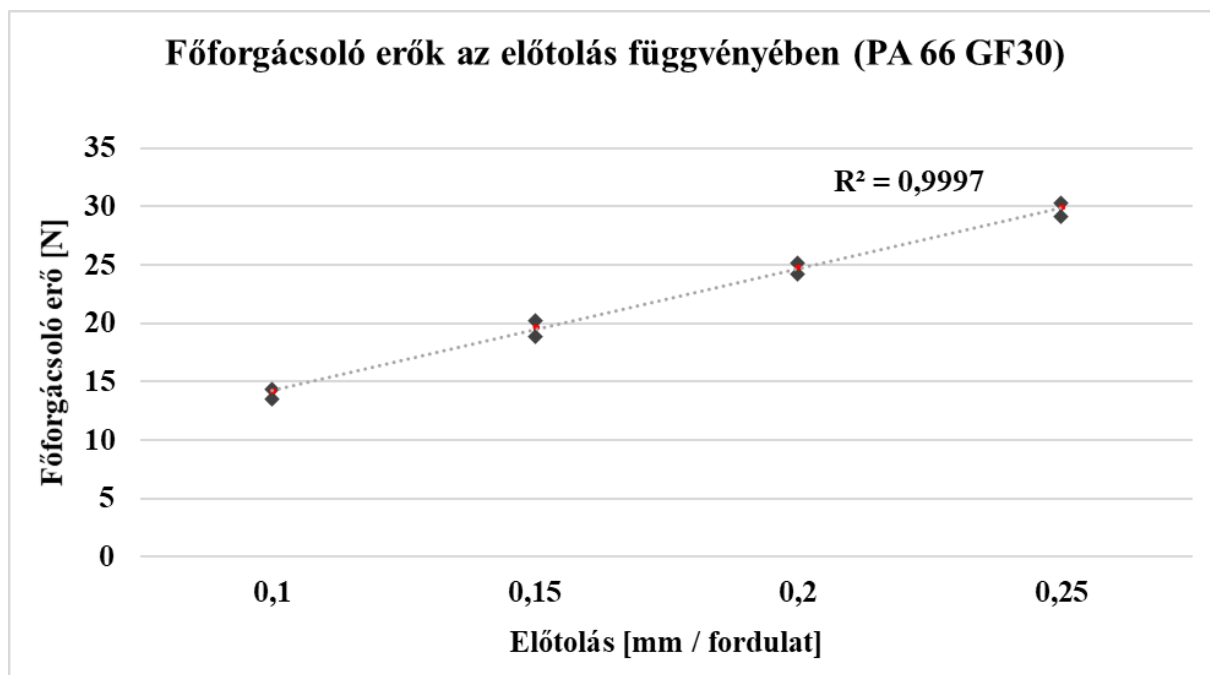
4.1.2. PA 66 GF30 átlagos főforgácsoló erői

A 4.1 táblázat módszeréhez hasonlóan a PA 66 GF30 anyagú munkadarabokon mért átlagos főforgácsoló erő eredményeit mutatja a 4.2. táblázat.

4. Eredmények

4.2. táblázat PA 66 GF30 főforgácsoló erői

PA 66 GF30 átlagos főforgácsoló erői												
1. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	13,61	13,86	13,83	14,05	13,87	14,18	14,18	13,84	14,19	14,55	13,75	14,21
0,15 [mm/ford]	18,98	19,23	19,07	19,42	19,44	19,89	19,97	19,33	19,83	20,03	20,06	19,67
0,2 [mm/ford]	24,16	24,83	24,47	24,45	24,54	25,12	25,21	24,22	24,93	25,26	25,29	24,81
0,25 [mm/ford]	29,39	29,90	29,46	29,67	29,60	29,86	30,29	29,13	30,00	30,06	30,08	29,79
2. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	13,36	14,47	14,50	14,25	14,81	14,74	14,71	14,35	14,47	14,63	15,02	14,83
0,15 [mm/ford]	19,11	20,11	19,50	19,74	19,62	20,24	21,38	19,39	20,09	20,25	20,45	19,87
0,2 [mm/ford]	24,80	24,92	24,88	25,22	25,38	25,09	25,23	24,94	25,36	25,38	25,56	25,23
0,25 [mm/ford]	29,56	29,92	30,22	29,85	30,57	30,41	30,73	30,03	30,65	30,47	30,52	30,15
3. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	13,61	14,13	14,01	14,14	13,67	13,52	13,96	13,44	14,05	13,74	13,63	14,05
0,15 [mm/ford]	18,63	19,67	19,57	19,37	18,74	18,66	19,22	18,41	19,35	19,35	19,41	19,15
0,2 [mm/ford]	23,85	24,95	24,96	24,54	23,97	23,78	24,60	23,50	24,65	24,68	24,76	24,28
0,25 [mm/ford]	29,03	30,16	30,04	29,51	29,16	28,97	29,85	28,30	29,87	29,65	29,83	29,32



4.3. ábra Főforgácsoló erők ábrázolása az előtolás függvényében PA 66 GF esetén

A 4.3. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

$$F_f(f) = 104,72f + 3,7454 \text{ [N]}$$

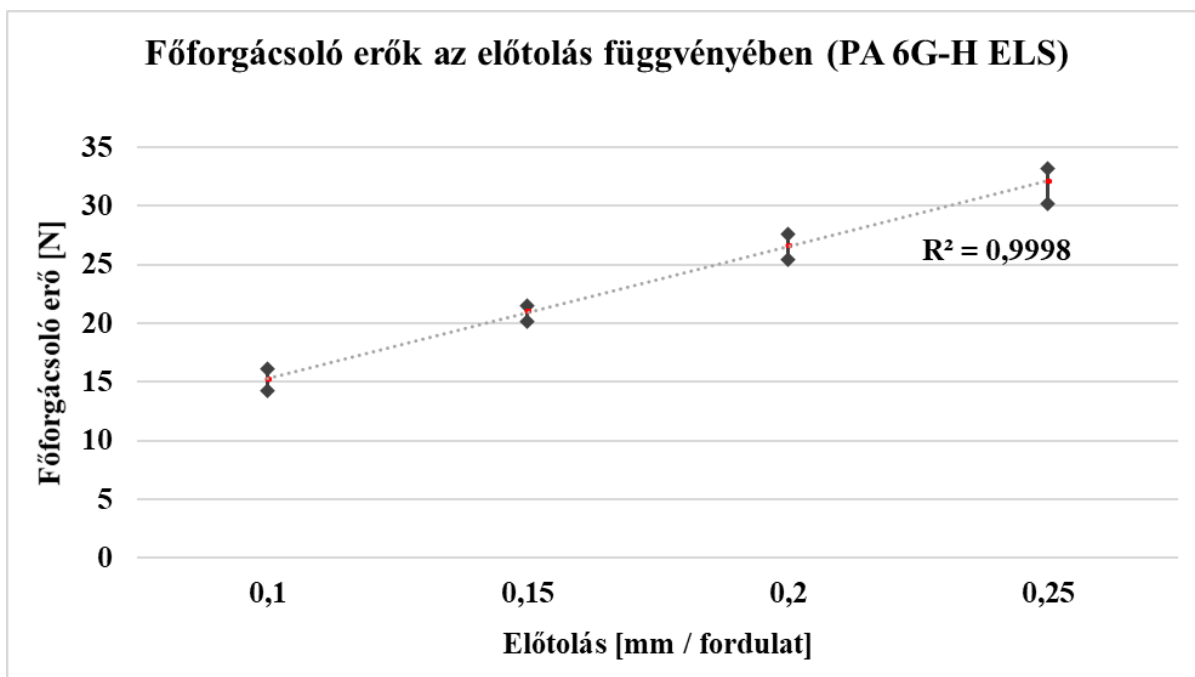
4. Eredmények

4.1.3. PA 6G-H ELS átlagos főforgácsoló erői

Végül szintén hasonló módszerrel mutatja a PA 6G-H ELS munkadarabokon mért átlagos főforgácsoló erőket a 4.3. táblázat.

4.3. táblázat PA 6G-H ELS főforgácsoló erői

PA 6G-H ELS átlagos főforgácsoló erői												
1. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	14,22	14,70	15,23	15,34	14,34	14,80	15,35	15,15	15,22	15,37	15,17	15,28
0,15 [mm/ford]	19,87	20,23	21,23	21,44	20,47	20,98	21,31	20,45	21,03	20,85	20,33	21,46
0,2 [mm/ford]	24,51	25,85	26,21	26,58	26,31	26,95	27,66	25,40	27,34	27,23	25,87	26,25
0,25 [mm/ford]	30,23	30,69	32,57	32,72	31,34	32,99	32,64	31,28	32,21	31,74	31,31	32,93
2. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	14,10	14,48	16,09	15,34	15,06	15,22	15,54	15,69	15,11	15,33	15,28	17,89
0,15 [mm/ford]	20,47	20,71	21,11	21,13	20,23	20,79	21,55	21,55	21,75	21,32	20,94	22,25
0,2 [mm/ford]	25,51	25,53	25,93	26,71	26,59	26,92	27,74	26,73	26,49	27,61	26,61	27,34
0,25 [mm/ford]	29,93	31,06	31,58	32,80	31,50	32,68	32,86	33,23	32,03	32,11	31,89	33,17
3. md	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	14,61	15,17	15,12	15,40	14,72	15,57	15,19	14,84	15,34	15,15	14,74	15,21
0,15 [mm/ford]	20,45	20,93	22,25	22,07	19,93	21,31	21,57	21,08	21,84	20,70	20,14	20,67
0,2 [mm/ford]	26,27	27,02	26,91	27,47	25,35	27,40	27,39	24,75	27,31	27,21	26,76	26,24
0,25 [mm/ford]	30,54	31,20	33,73	34,20	30,44	32,59	32,53	30,22	33,60	32,66	32,58	32,73



4.4. ábra Főforgácsoló erők ábrázolása az előtolás függvényében PA 6G-H ELS esetén

A 4.4. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

4. Eredmények

$$F_f(f) = 104,72f + 3,7454 \text{ [N]}$$

Az eredményeket anyagonként összefoglalva mutatja a 4.4. táblázat. Az értékek a 4.1 táblázat, a 4.2. táblázat és a 4.3. táblázat értékeinek számtani közepe anyagonként, századra kerekítve.

4.4. táblázat Főforgácsoló erők átlagai

PA 6 E	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	16,02	14,69	15,20	14,87	15,95	15,00	15,50	14,94	14,94	15,32	16,72	15,41
0,15 [mm/ford]	21,00	21,05	21,30	22,07	19,82	21,20	22,05	20,95	20,66	20,99	21,01	22,75
0,2 [mm/ford]	25,53	26,59	26,00	25,58	25,23	26,79	26,88	26,70	27,19	26,54	26,61	26,38
0,25 [mm/ford]	30,55	31,99	31,35	30,78	31,02	33,42	31,80	30,39	31,98	32,65	31,92	33,15
PA 66 GF30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	13,53	14,15	14,11	14,15	14,12	14,15	14,28	13,88	14,23	14,31	14,14	14,36
0,15 [mm/ford]	18,91	19,67	19,38	19,51	19,27	19,59	20,19	19,04	19,76	19,88	19,97	19,57
0,2 [mm/ford]	24,27	24,90	24,77	24,73	24,63	24,66	25,02	24,22	24,98	25,10	25,20	24,77
0,25 [mm/ford]	29,33	29,99	29,91	29,67	29,77	29,74	30,29	29,15	30,17	30,06	30,15	29,75
PA 6G-H ELS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1 [mm/ford]	14,31	14,78	15,48	15,36	14,71	15,20	15,36	15,23	15,23	15,28	15,06	16,12
0,15 [mm/ford]	20,27	20,62	21,53	21,55	20,21	21,03	21,48	21,03	21,54	20,95	20,47	21,46
0,2 [mm/ford]	25,43	26,13	26,35	26,92	26,08	27,09	27,60	25,62	27,05	27,35	26,41	26,61
0,25 [mm/ford]	30,23	30,98	32,63	33,24	31,09	32,75	32,68	31,58	32,61	32,17	31,93	32,94

Ezek alapján megállapítható tehát, hogy a vizsgált anyagokra, a vizsgált tartományon belül, állandó fogásmélység mellett igaz az, hogy a főforgácsoló erő nem függ a forgácsoló sebességtől, továbbá a munkadarab átmérőjétől – amennyiben a forgácsoló sebesség állandó értéken van tartva – hanem csak és kizárólag az előtolás nagyságától függ.

4.2. A rezgés- és a felületi érdességmérés eredményei

S. Swain et. al. (2019) szerint a rezgések hatással vannak a megmunkálási jellemzőkre, mint például a szerszám élettartama, méretpontosság és felületi érdesség, így a rezgésmérés eredményeit a felületi érdességmérés eredményeimmel együtt mutatom be.

A rezgésmérés eredményeit a Condmaster Ruby nevű szoftverben az összes fájlt egyesével átkonvertáltam .txt formátumba, így későbbi kezelése megoldódott számomra, melyhez a Matlab R2019b nevű szoftvert használtam.

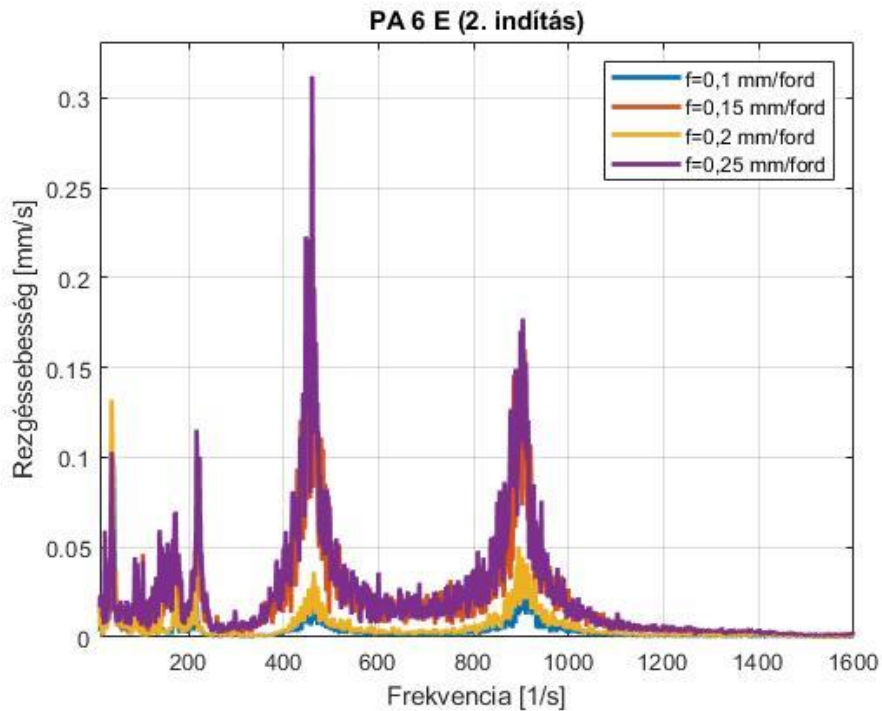
A Matlab képes beolvasni az adatsorokat, viszont csak azokat, amelyeket a Condmaster Ruby a mentés pillanatában megjelenített. A mentéskor épp a rezgésgyorsulás értékeit tanulmányoztam a frekvencia függvényében, így az eredményeimet is ennek megfelelően mutatom diagramok formájában.

Az összes eredményt nincs módomban bemutatni a meglehetősen nagy darabszám miatt, így kiragadtam anyagonként egy, azonos paraméterekhez (kivéve előtolás) tartozó eredménycsoportot, melyeket a továbbiakban ismertetek.

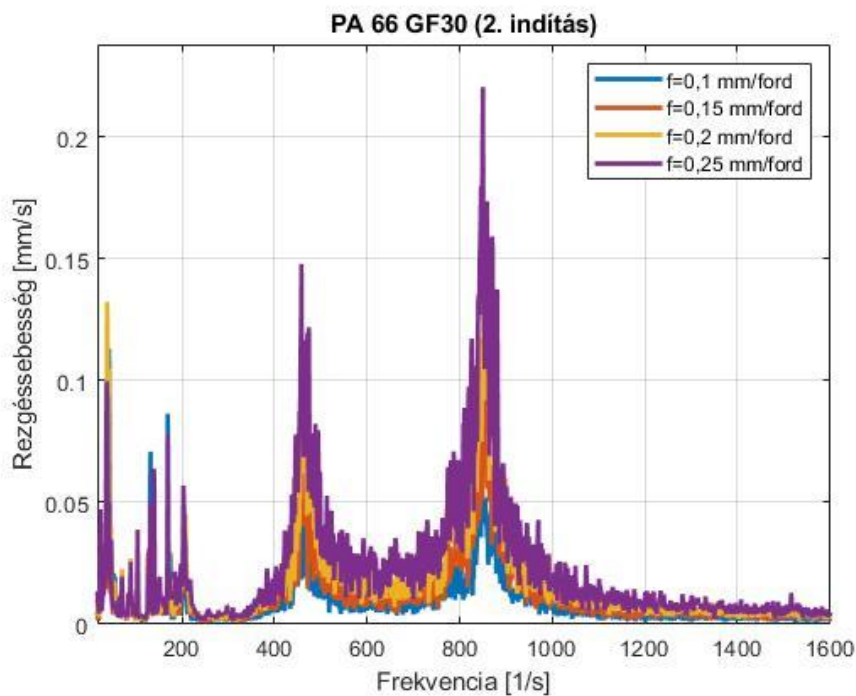
4. Eredmények

Anyagonként készítettem a diagramokat, melyeken négy különböző színnel jelöltem a négy előtolás értéket. Az összehasonlíthatóság érdekében három diagramot mutatok be, melyeknél a bemeneti paraméterek teljesen megegyeztek. A diagramcímekben szereplő „indítás” a 3.1. táblázat „indítások száma” sorának felel meg a bemeneti paramétereket tekintve.

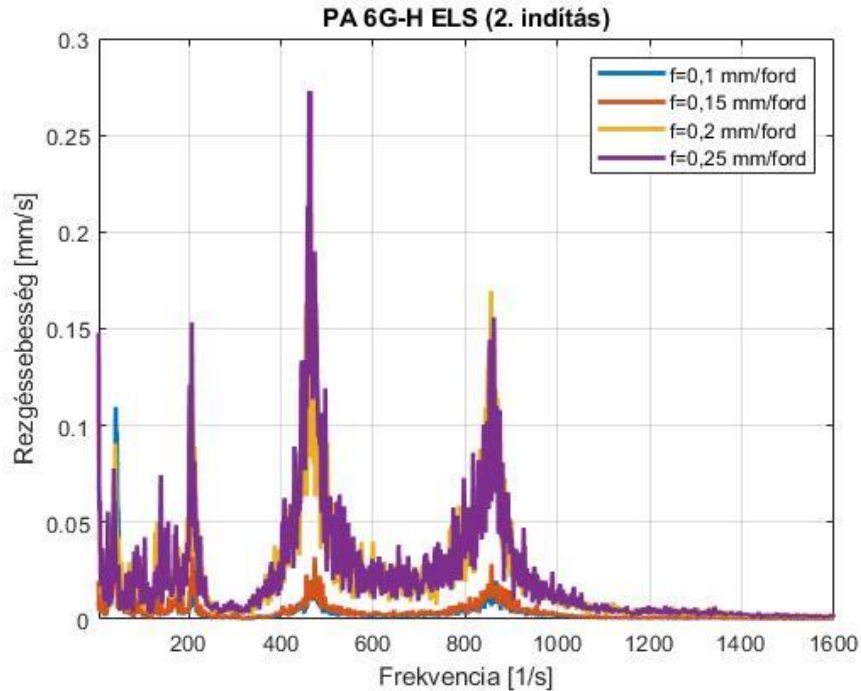
A 4.5. ábra, a 4.6. ábra és a 4.7. ábra mutatják rendre a PA 6 E, PA 66 GF 30 és a PA 6 G-H ELS anyagok rezgésdiagramját a 2. indítás esetén.



4.5. ábra Rezgéssebesség értékek a frekvencia függvényében PA 6 E esetén



4.6. ábra Rezgéssebesség értékek a frekvencia függvényében PA 66 GF30 esetén



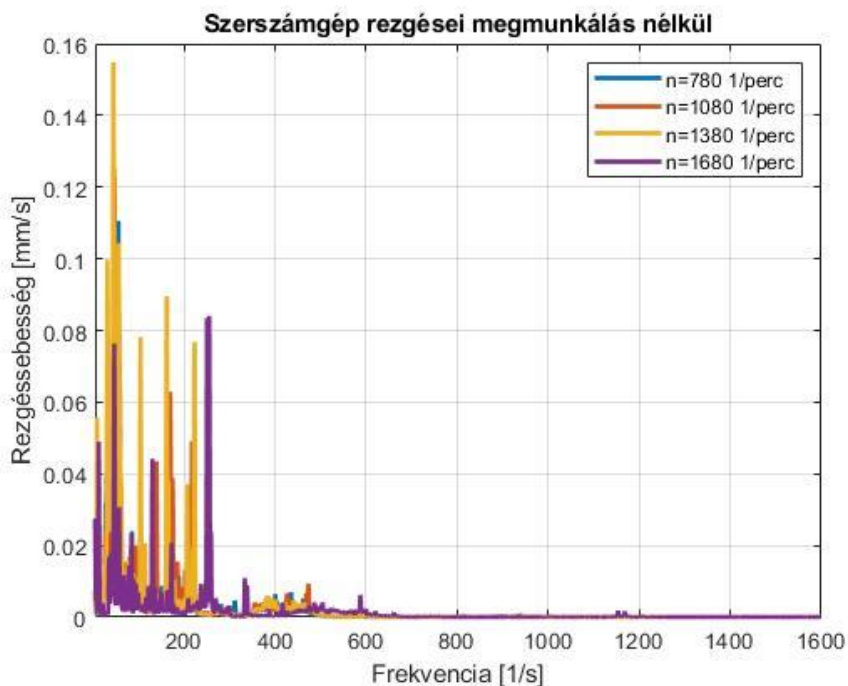
4.7. ábra Rezgéssebesség értékek a frekvencia függvényében PA 6G-H ELS esetén

Mindhárom ábrán megfigyelhető két szignifikáns csúcs. Látható, hogy ezek a csúcsok közel azonos frekvenciaértéken jelentkeznek előtolástól függetlenül. Fontos megemlítenem, hogy néhány kivételtől eltekintve – amiket alább említek majd – nagyon hasonló eredményeket tapasztaltam, azaz mindig két szignifikáns csúcs figyelhető meg az ábrákon, melyek fordulatszámától, előtolástól és anyagtól függetlenül mindig közel ugyanakkora frekvenciaértéken jelentkeznek. Látható továbbá, hogy az alacsonyabb (0-230 Hz) frekvenciákon is mértem jelentős rezgéssebesség értékeket. Ezt a jelenséget alább részletezem.

További mérési eredmények láthatók diagram formájában az M6 mellékletben.

S. kim és K. Ahmadi (2019) szerint a gyakorlatban a forgácsvastagság statikus összetevője harmonikus erőket, ebből következően harmonikus választ generál a főorsó forgási frekvenciáján, illetve annak egész számú többszörösén. A harmonikus komponensek általában uralják a válaszspektrumot. Ha a harmonikus komponensek frekvenciái jól elkülönülnek a rendszer modális frekvenciáitól, egyszerűen figyelmen kívül hagyhatjuk a nullához közeli csillapítású pólusokat az orsó forgási frekvenciájának harmonikusainál, mert ezek a válasz harmonikus összetevőit képviselik.

Ahhoz, hogy megállapítsam a szerszám gép rezgéseit, méréseket végeztem tokmányba befogott munkadarabbal, ahol a tokmány forgott, viszont megmunkálás és előtoló mozgás nem volt, szintén a 3.1. táblázat fordulatszámértékeinek megfelelően. Ezt a diagramot szemlélteti a 4.8. ábra.



4.8. ábra Megmunkálás és elötolás nélkül mért értékek a szerszámgépen

Látható, hogy a korábbi két szignifikáns csúcs ebben az esetben egyáltalán nem jelenik meg. Ez a mérés igazolja S. kim és K. Ahmadi (2019) állítását, mivel a két csúcs a megmunkálás nélküli rezgésmérésnél nem jelentkezett, továbbá ahol jelentkezett, ott jól elkülöníthetőek voltak a modális, azaz környezettől függő frekvenciáktól. Állításuknak megfelelően tehát a továbbiakban a két csúcscsal nem foglalkozom.

A 4.8. ábra mutatja, hogy megmunkálás nélkül a 0-230 1/s tartományban vannak a szignifikáns rezgések a szerszámgépen.

A felületi érdességmérés esetén a gyakorlatban leggyakrabban használt R_a , azaz átlagos felületi érdesség értékeket emelem ki (2.18 ábra), mert általában az R_a érték alapján dönthetjük el, hogy a megmunkált felület minősége megfelelő-e az adott célra.

A 4.5. táblázat mutatja az átlagos felületi érdességmérés eredményeit PA 6 E anyag esetén. Az ábra bal felső sarkában látható az aktuális anyag neve, ez alatt az indítások száma. Fent a három különböző munkadarab számát láthatjuk, ezek alatt pedig az elötolás értékét mm/fordulat egységben.

A 4.5. táblázat, a 4.6. táblázat és a 4.7. táblázat mutatja rendre a PA 6 E, a PA 66 E GF30 és a PA 6 G-H ELS anyagokon mért átlagos felületi érdességmérés eredményeit.

Néhány további felületi érdességmérés jegyzőkönyv megtekinthető az M7 mellékletben.

4. Eredmények

4.5. táblázat Átlagos felületi érdesség értékek PA 6 E esetén

PA 6 E	1. munkadarab				2. munkadarab				3. munkadarab			
	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25
1	1,81	1,8	2,38	3,07	1,86	1,89	2,53	3,08	1,84	1,77	2,33	3,06
2	1,35	1,67	2,26	2,96	1,21	1,63	2,34	3,04	1,18	1,56	2,21	3,05
3	1,26	1,66	2,26	2,94	1,28	1,48	2,25	3,04	1,23	1,5	2,24	3,01
4	1,28	1,78	2,33	3,03	1,38	1,84	2,28	3,11	1,75	1,72	2,33	3,07
5	1,22	1,42	2,26	3,07	1,37	1,47	2,24	3,01	1,3	1,59	2,27	3,11
6	1,1	1,53	2,25	3,02	1,1	1,49	2,28	3,07	1,08	1,46	2,21	3
7	1,33	1,57	2,28	2,96	1,3	1,59	2,23	3,04	1,31	1,66	2,3	3,11
8	1,28	1,68	2,2	3,02	1,41	1,52	2,35	3,03	1,63	1,73	2,33	3,13
9	1,06	1,46	2,26	2,93	1,55	1,58	2,41	3,08	1,17	1,44	2,24	3,05
10	4,28	1,46	2,23	2,92	4,21	1,47	2,32	3,01	2,85	1,55	2,35	3,03
11	4,43	1,55	2,38	3	5,09	1,51	2,33	3,1	4,98	1,53	2,4	3,04
12	3,69	1,54	2,25	2,89	6,34	1,58	2,35	3,12	4,12	1,65	2,43	3,04

4.6. táblázat Átlagos felületi érdesség értékek PA 66 E GF30 esetén

PA 66 E GF30	1. munkadarab				2. munkadarab				3. munkadarab			
	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25
1			2,35	3,05	1,52	1,86	2,34	2,85	1,36	1,81	2,4	3,04
2	1,33	1,73	2,42	2,92	1,54	1,7	2,2	2,93	1,57	1,71	2,38	3,07
3	1,22	1,73	2,54	3,08	1,26	1,79	2,44	2,89	1,33	1,72	2,22	2,91
4	1,29	1,71	2,39	3,06	1,28	1,91	2,44	3,05	1,48	1,77	1,77	1,51
5	1,27	1,79	2,39	3,19	1,3	1,77	2,46	3,09	1,33	1,65	2,51	3,06
6	1,14	1,7	2,38	3,07	1,22	1,73	2,37	2,95	1,22	1,78	2,51	2,97
7	1,26	1,81	2,36	3,04	2,95	1,7	2,51	2,9	1,48	1,69	2,44	3,05
8	2,46	1,84	2,22	2,9	1,36	1,72	2,22	2,98	1,86	1,63	2,45	3,14
9	2,34	1,73	2,38	2,84	1,44	1,71	2,37	2,89	1,4	1,83	2,27	3,07
10	1,29	1,69	2,33	2,87	1,37	1,68	2,29	2,81	1,32	1,67	2,33	3,06
11	1,31	1,72	2,41	3,01	1,25	1,72	2,37	2,95	1,37	1,82	2,29	2,9
12	2,11	1,73	2,34	2,96	1,36	1,72	2,38	2,95	1,47	1,74	2,25	3,18

Az 1. munkadarabhoz és 0,1, továbbá 0,15 mm/fordulat előtolás értékhez tartozó értékek hiányoznak, mert az adatok mentésénél technikai problémák léptek fel, amit utólag kijavítani sajnos nem állt módomban.

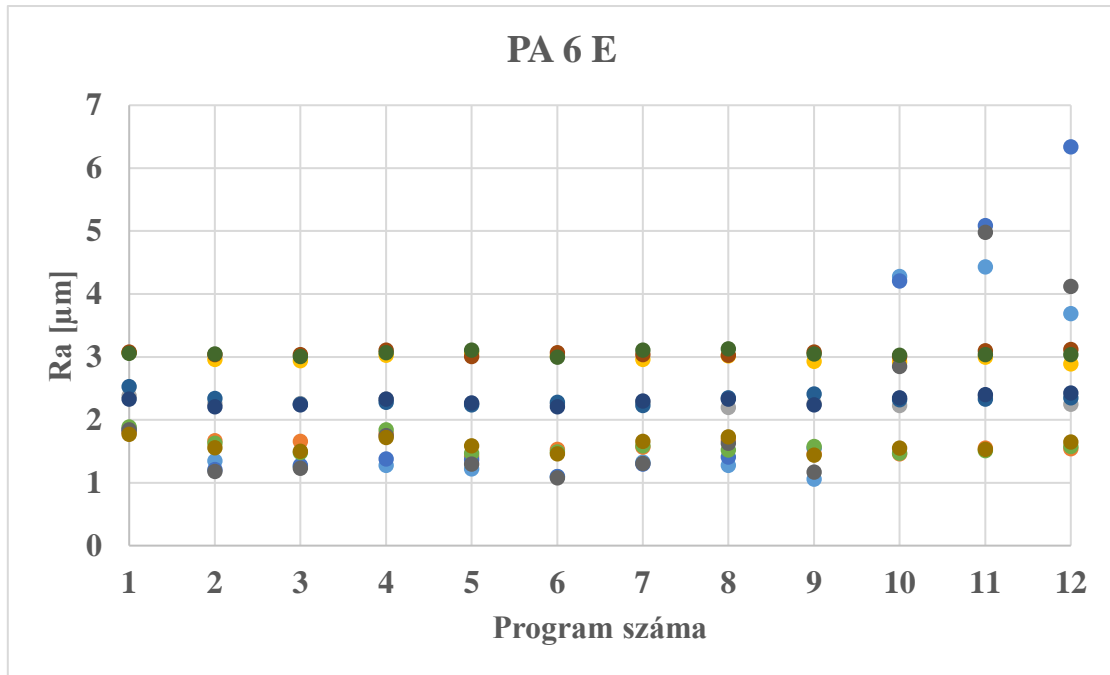
4.7. táblázat Átlagos felületi érdesség értékek PA 6 G-H ELS esetén

PA 6 G-H ELS	1. munkadarab				2. munkadarab				3. munkadarab			
	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25	f 0,1	f 0,15	f 0,2	f 0,25
1	1,25	2,44	2,16	2,83	1,25	1,55	2,18	2,76	1,32	1,29	2,1	2,59
2	1,43	1,8	1,92	2,55	1,24	1,36	1,93	2,77	1,31	1,42	2,1	2,78
3	1,24	1,71	2,11	2,8	1,69	1,7	2,02	2,73	2,46	1,84	2,24	2,84
4	1,68	1,77	2,27	2,8	4	1,87	2,23	2,82	1,59	1,74	2,42	2,94
5	1,55	1,53	2,44	3,02	1,14	1,79	2,38	3,03	1,23	1,57	2,53	3,46
6	1,33	1,54	2,17	3,13	1,22	1,61	2,28	3,02	2,6	1,55	2,49	3,04
7	1,39	1,65	2,41	3,05	2,16	1,77	2,56	3,12	2,79	1,87	2,45	3,11
8	3,28	1,72	2,42	3,06	5,03	2,08	2,37	3,02	1,93	1,9	2,66	3,17
9	2,3	1,63	2,41	3,03	2,11	1,81	2,54	3,2	1,47	1,94	2,52	3,05
10	3,46	1,62	2,46	3,37	1,53	1,55	2,53	3,14	3,51	1,68	2,47	3,07
11	6,72	1,68	2,37	3,05	1,96	1,61	2,37	2,97	1,22	1,57	2,42	3,03
12	8,14	2,03	2,49	3,01	1,87	1,83	2,49	3,13	2,25	1,85	2,36	3,04

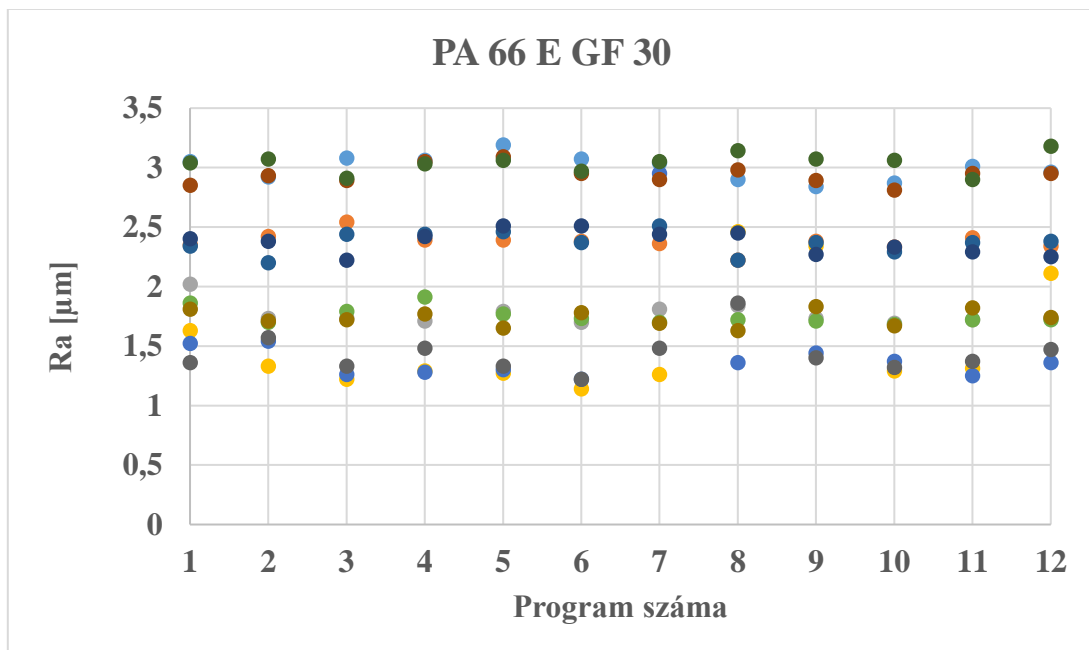
Látható, hogy az átlagos felületi érdesség értékek és az előtolás között összefüggés van. Az általam használt esztergalapka esetén elmondható, hogy minél nagyobb az előtolás értéke, annál nagyobb lesz az átlagos felületi érdesség értéke. Ez azonban több tényező függvénye. A forgácsolási folyamat során keletkező rezgések szignifikánsan befolyásolják a felületi érdességet, mely az anyag csillapításával áll kapcsolatban. Gyakran használnak viszkoelasztikus anyagokat forgácsolás esetén, mint csillapító réteget, mivel ezekben az anyagokban a viszkózus komponens képes elnyelni vibrációs energiát (Y. Liu et. al., 2019) Nagy munkadarab, vagy nagy szerszámkilógás esetén a szerszám és a munkadarab között létrejött rezgések nem elhanyagolhatók. A kilógás mértékét az l/d viszonyszám mutatja, azaz a munkadarab vagy szerszám hossza a befogástól, osztva a munkadarab vagy szerszám átmérőjével. Kutatásomban megmunkálás során a munkadarab kilógása változott folyamatosan, mivel palástesztergálást végeztem. Ezt úgy kell érteni, hogy a megmunkálás helye és a szerszám aktuális helyzete közötti távolság változott folyamatosan, amit értelmezhetünk a munkadarab kilógásának.

A felületi minőséget a forgácsleválás milyensége is befolyásolja. Ha a forgácsleválás nem kedvező, azaz nem elemi forgács keletkezik, hanem folyóforgács, akkor az a megfelelő forgácselvezetés vagy megfelelő hűtési módszer alkalmazásának hiányában feltekeredhet. Ez a nem kívánatos jelenség nagyon gyakori polimer anyagok esztergálásakor. Kiváltképp igaz ez a szívós polimerekre, melyeknek csillapítása magas.

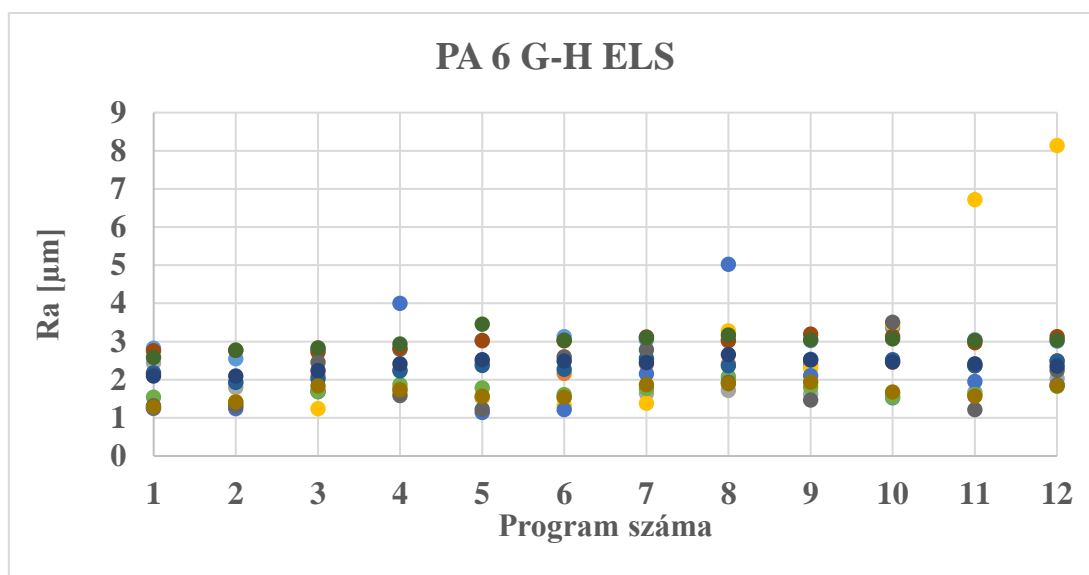
A 4.9. ábra, 4.10. ábra és a 4.11. ábra diagram formájában mutatja az érdességmérés eredményeit a CNC programok függvényében.



4.9. ábra PA 6 E érdességmérésének eredményei



4.10. ábra PA 66 E GF30 érdességmérésének eredményei



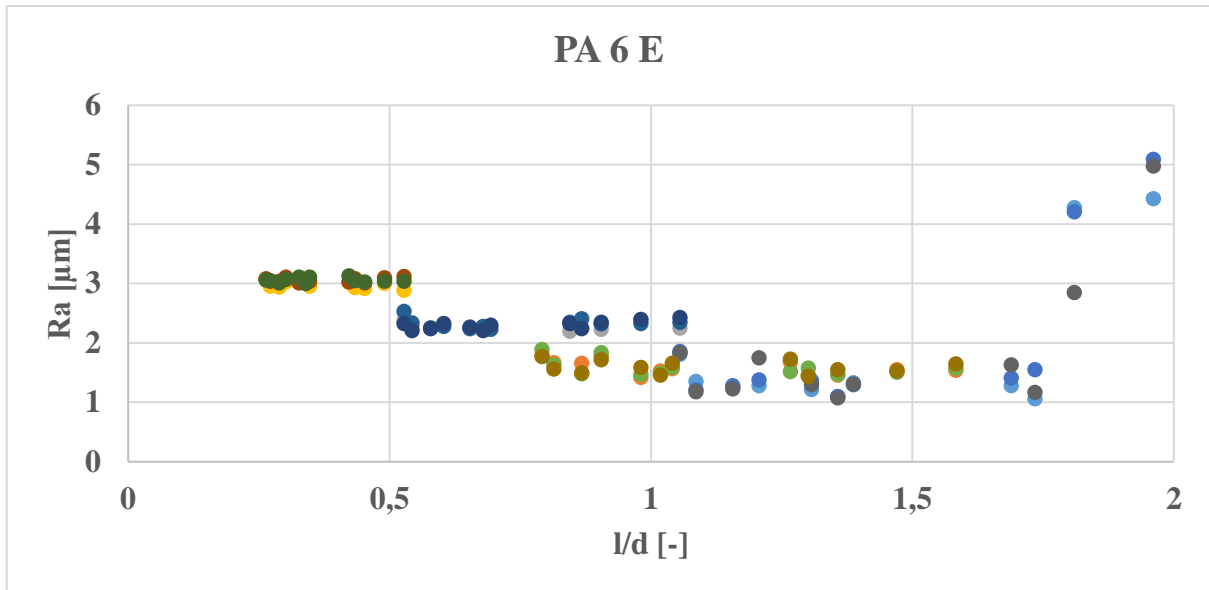
4.11. ábra PA 6 G-H ELS érdességmérésének eredményei

Minden CNC programhoz 12 pont tartozik. Az azonos munkadarabhoz tartozó pontok színei azonosak. Látható, hogy az esetek többségében az azonos színű pontokhoz közel azonos R_a érték tartozik. Néhány esetben azonban kiugróan magas R_a érték látható. Amennyiben a rendellenesen magas átlagos felületi érdességérték a 9. indítás előtt látható, azt minden esetben a levált folyóforgács feltekeredése okozta. Ilyen esetekben a forgácsoló erők is megnövekedtek, hiszen a szerszám tolta maga előtt a levált és felgyülemlett forgácsot. A felület minősége ebben az esetben azért rosszabb, mert a levált és feltekeredett forgács, valamint a munkadarab közötti folyamatos súrlódás során keletkezett hő megolvasztja a megmunkált felületet.

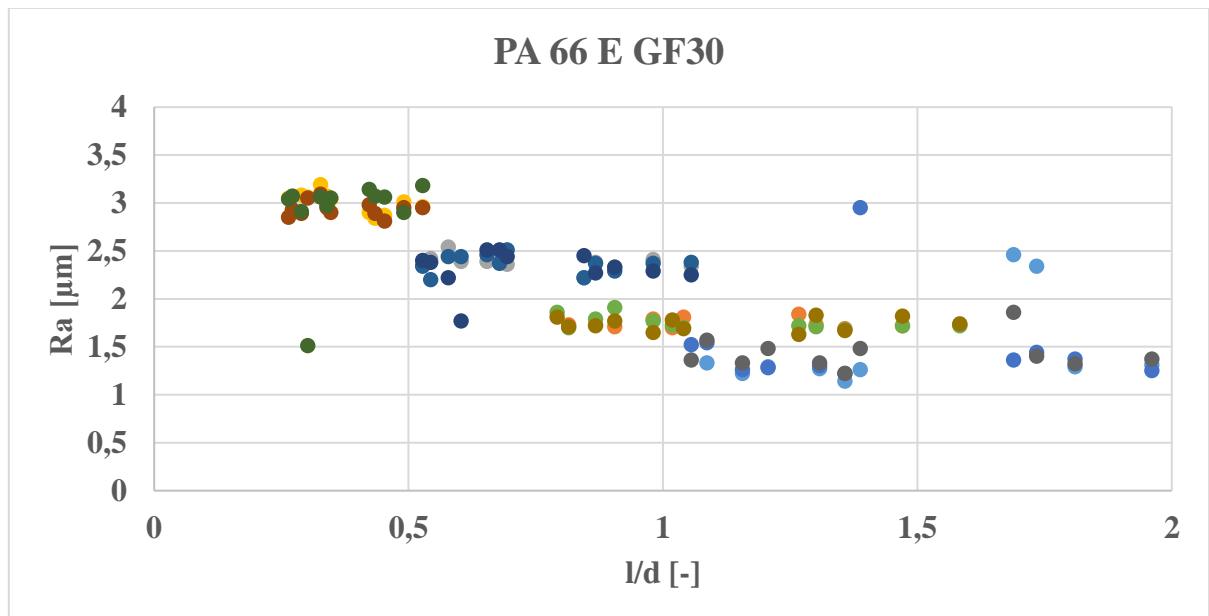
Az ilyen jellegű kutatásoknál gyakran alkalmazzák a megmunkálási stabilitás kifejezést. M. Fallah és B. Moetakef-Imani (2019) szerint a forgácsolás stabilitását minden anyagra mérésel lehet meghatározni és az a csillapítás függvénye. A forgácsoló rendszer stabilitásának meghatározása a forgácsoló erők, a rezgések és a felületi érdesség értékek alapján történik.

Látható a diagramokból, hogy a rendellenes jelenségek minden esetben 0,1 mm/fordulat előtolás értéken voltak. Ez azért van így, mert minden esetben az említett előtolás esetén volt a legnagyobb a munkadarab kilógása (1. szakasz). Ez alátámasztja azt, hogy a felületi minőség szignifikánsan függ a munkadarab kilógásától, illetve a nagy kilógásból eredő keletkezett rezgések mértékétől.

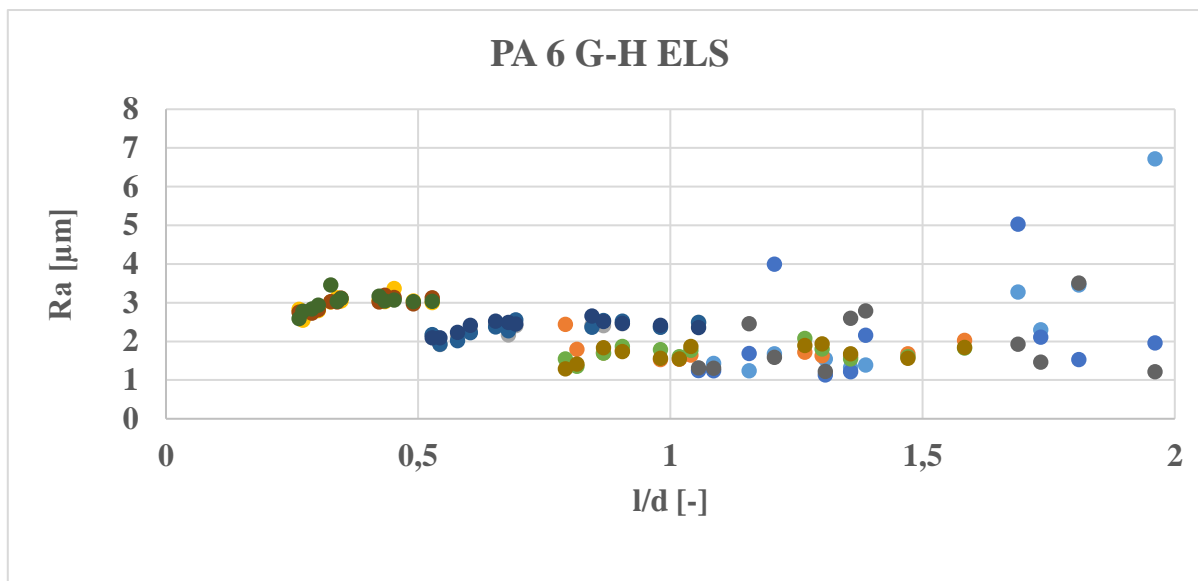
Méréseimnél a munkadarab sem csúccsal, sem bábbal nem volt megtámasztva, így megvizsgáltam az érdességmérés eredményeit az l/d viszony függvényében is. A 4.12. ábra, 4.13. ábra és a 4.14. ábra mutatja az átlagos felületi érdesség értékeit az l/d mértékegység nélküli viszonyszám függvényében. Kilógás értékeként (l) a négy mérési szakasz közepeivel, míg átmérőként (d) a megmunkált felület átmérőjével számoltam. Utóbbit azért tettem, mert ugyan a tokmányba befogott átmérő minden esetben 35 mm volt, viszont a munkadarab ütköztetve volt a tokmánynak axiális irányból.



4.12. ábra Átlagos felületi érdesség az l/d viszony függvényében PA 6 E esetén

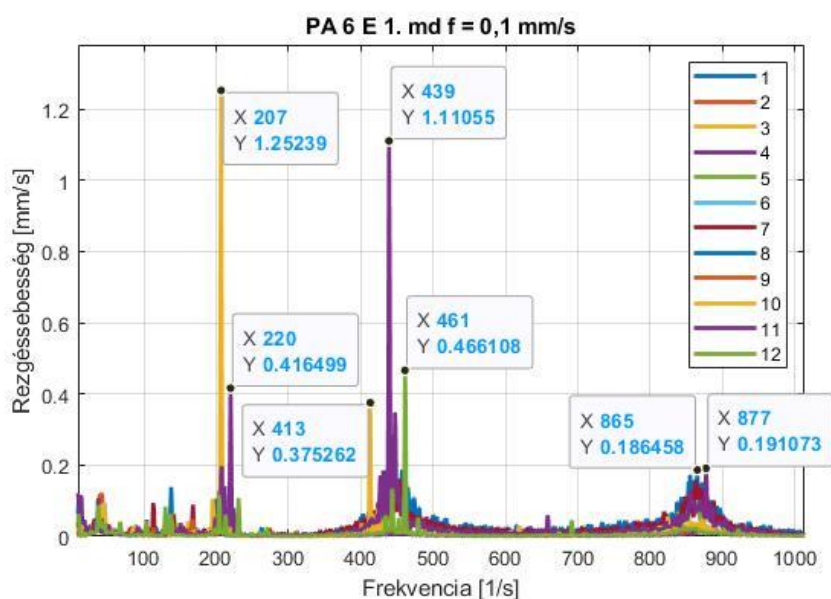


4.13. ábra Átlagos felületi érdesség az l/d viszony függvényében PA 66 E GF30 esetén



4.14. ábra Átlagos felületi érdesség az l/d viszony függvényében PA 6 G-H ELS esetén

A kiugróan magas felületi érdesség értékek a legnagyobb kilógás esetén voltak minden esetben, így ezeket külön mutatom be. Az 1. mérési szakasz rezgésértékeit mutatja a 4.15. ábra PA 6 E próbatest esetén.



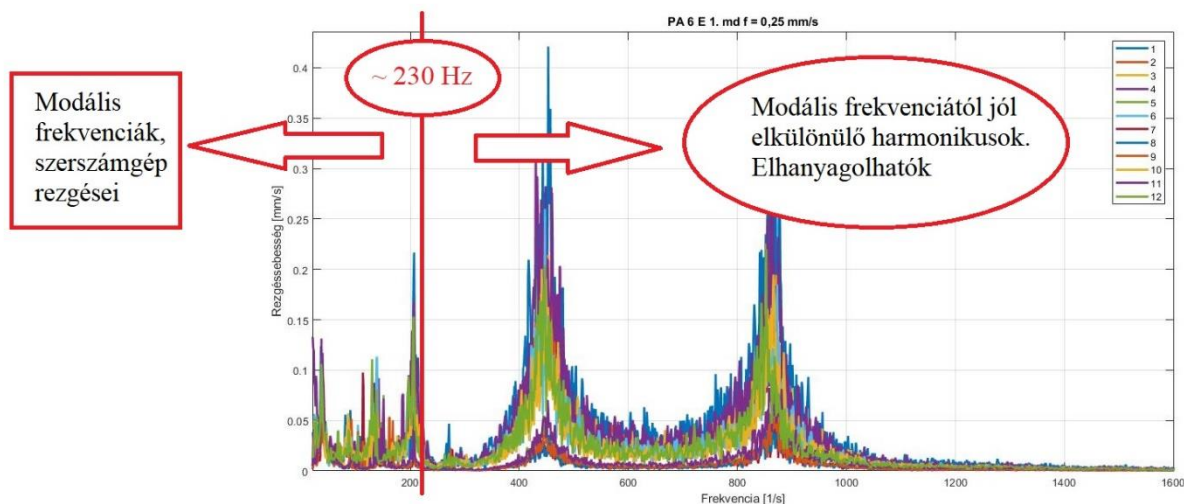
4.15. ábra Az 1. szakasz mérési eredményei PA 6 E 1. munkadarab esetén

Látható, hogy 200-220 Hz frekvencián ezen a szakaszon kiemelkedően magas rezgésyorsulás értékek jelentkeznek. Ezt minden anyagnál tapasztaltam a 9. indítás utáni méréseimnél. Ez szintén a megnövekedett l/d viszonyozással magyarázható, hiszen ekkor a munkadarab átmérője lecsökkent, a 4. mérési szakasz tokmánytól való távolsága viszont állandó. Könnyen belátható, hogy ha egy tört számlálóját csökkentjük, akkor a tört értéke nő.

Megállapítható, hogy a vizsgált tartományon belül, a beállított bemeneti paraméterek és peremfeltételek mellett, nagy l/d viszony esetén (>1,8) a megmunkálás során keletkező szignifikáns rezgések eltérők. Ebben az esetben a legjelentősebb rezgésebség értékek

alacsonyabb frekvencián (200-250 Hz) jelentkeznek és értékük magasabb, mint kisebb kilógások esetén ($l/d < 1,8$).

A 4.16. ábra összefoglalva mutatja, hogy kutatásom szempontjából mely rezgéstartomány a mérvadó. Az ábrán a példa kedvéért PA 6 E anyag és $f=0,25$ mm/ford. esetén szemléltetem, hogy kutatásom szempontjából a fentiek alapján az alacsonyabb, azaz 230 Hz frekvencia alatti rezgések fontosak, így a tribológiai vizsgálataim során ebből az alacsony frekvenciájú tartományból ragadtam ki értékeket a tribológiai méréseimhez.

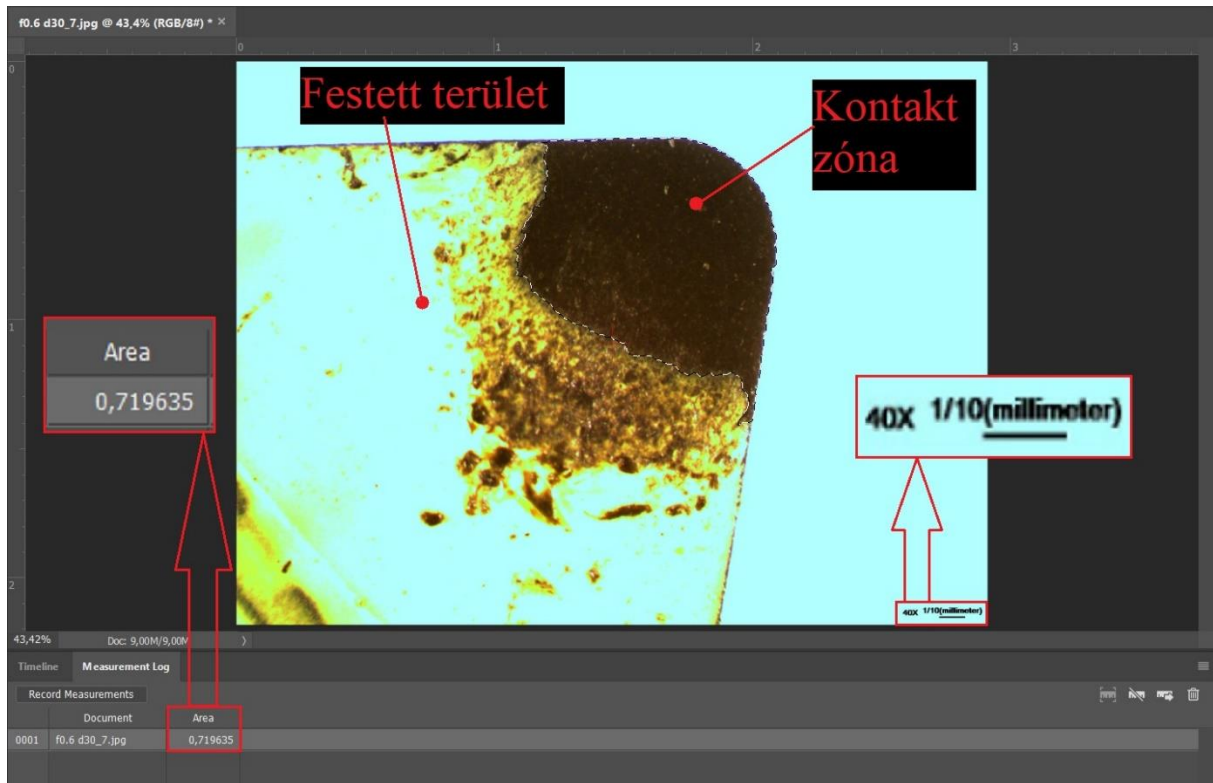


4.16. ábra Rezgéstartományok szemléltetése

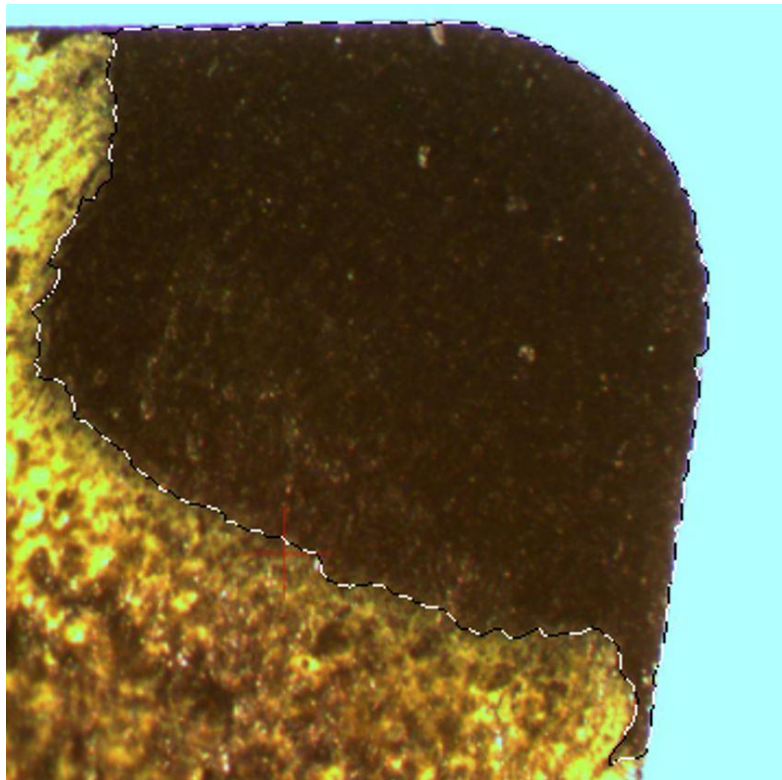
4.3. A kontakt zóna felületének mérési eredményei

Miután betöltöttem a mikroszkóp kamerájával készített képet az Adobe Photoshop CC 2018 nevű szoftverbe, és kijelöltem a területet az alábbi képet kaptam (4.17. ábra), melyről a kijelölt terület értéke (balra lent) egyszerűen leolvasható. A 4.18. ábra mutatja, hogy a szoftver megfelelően jelölte ki a területet (fekete-fehér szaggatott vonal). Amennyiben nem megfelelő volt a kijelölés, a kijelölés érzékenységét módosíthattam a 'Quick Selection' menüben. A szoftver a megfelelő konfigurálás után mm^2 dimenzióban írta ki az értéket.

A szoftverbe betöltött képekről készített képernyőfotókat mutatja az M8 melléklet.



4.17. ábra Terület kijelölése a szoftverben



4.18. ábra Kontakt zóna kijelölése (szaggatott vonallal) a szoftverben

Az ábrákon látható, hogy a sárga színű festék a lapka bizonyos területéről határozottan lekopott, a többi részén vagy sárga maradt, vagy pedig foltos. Utóbbi vélhetően a levált folyóforgács leválás utáni mozgása okozta. A festett és kopott területek jól elkülöníthetők egymástól.

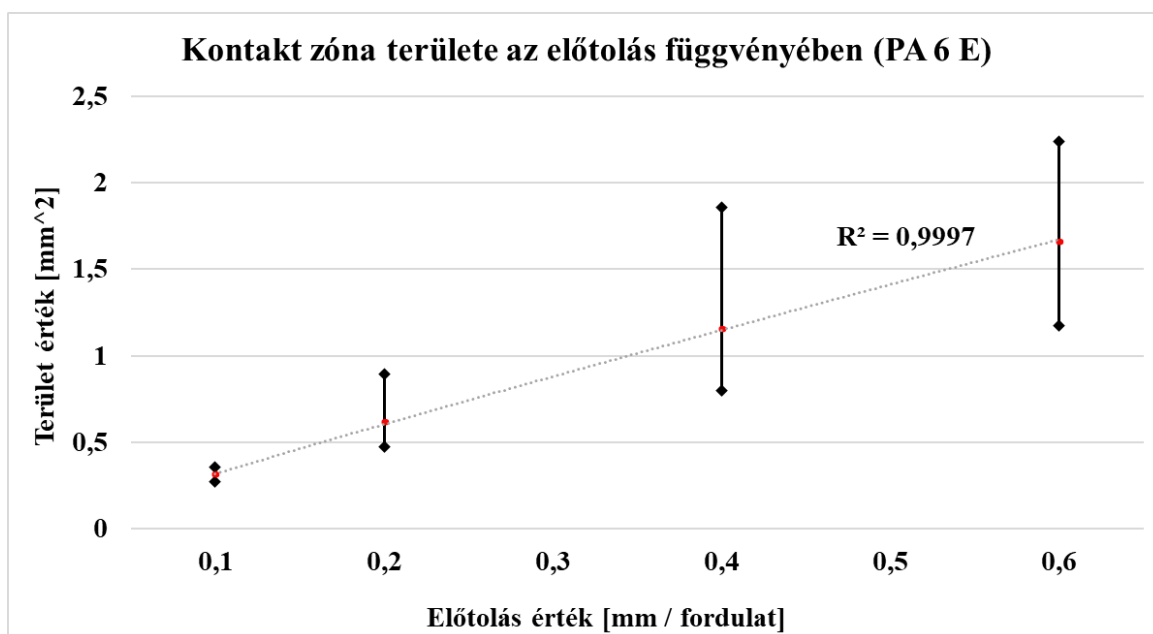
4.3.1. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 6 E esetén

A kontakt zóna mérésére vonatkozó eredményeket a 4.8. táblázat és a 4.19 ábra foglalja össze PA 6 E anyagra.

4.8. táblázat Kontakt zóna területértékei PA 6 E esetén, mm² -ben

PA 6 E	f 0,1 [mm/ford]	f 0,2 [mm/ford]	f 0,4 [mm/ford]	f 0,6 [mm/ford]
1. mérés	0,325	0,893	1,857	2,133
2. mérés	0,299	0,555	1,065	1,176
3. mérés	0,309	0,775	0,872	1,777
4. mérés	0,282	0,545	0,8	1,426
5. mérés	0,318	0,617	1,474	2,239
6. mérés	0,351	0,533	1,181	1,264
7. mérés	0,27	0,531	1,1	2,019
8. mérés	0,354	0,475	0,881	1,199
ÁTL	0,3135	0,6155	1,15375	1,654125
SZÓRÁS	0,028094	0,13452	0,333081	0,412252

Diagramokat készítettem, hogy jól szemléltessem a kapcsolatot a kontakt zóna területe és az előtolás értéke között. A diagramokat a Microsoft Excel nevű szoftverrel készítettem. A diagramokat ábraként szemlélteti a 4.19. ábra, a 4.20. ábra és a 4.21. ábra. Az R² számokat a diagramon tüntettem fel, a trendvonalak egyenletei pedig a megfelelő ábrák alatt látható. A diagramokon az egyes előtolás értékekhez tartozó átlagos kontakt zóna területérték (piros jelölő), valamint a kontakt zóna területértékeinek terjedelme látható.



4.19. ábra Kontakt zóna területe az előtolás függvényében PA 6 E anyag esetén

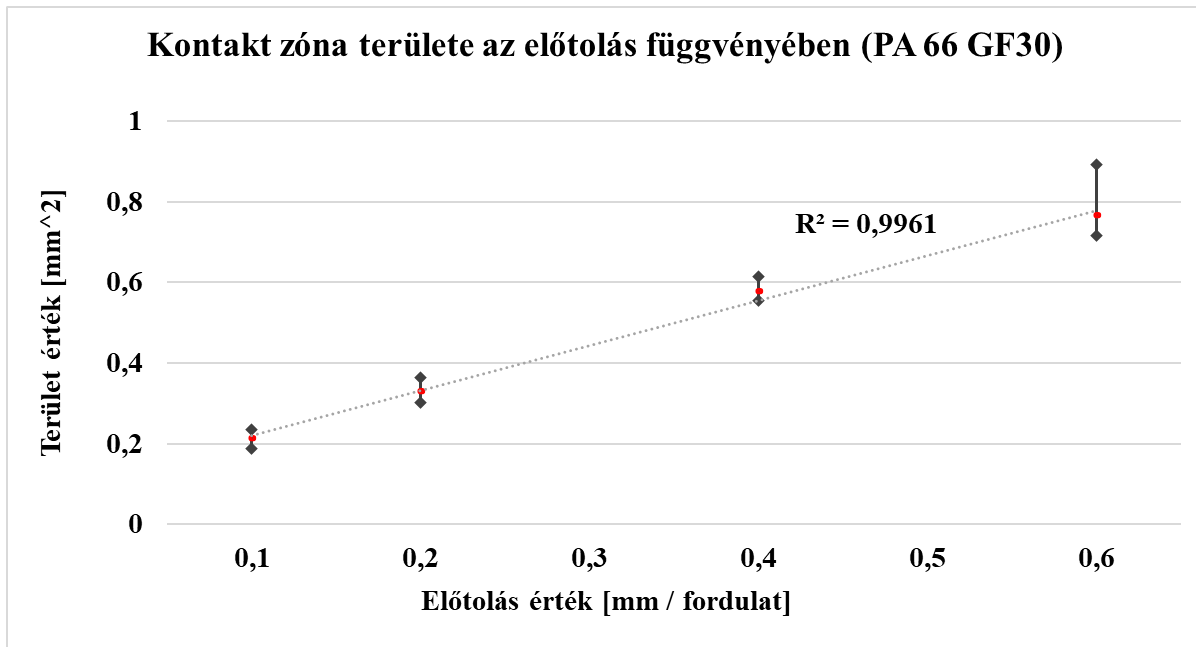
A 4.19. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

$$A_t(f) = 2,6708f + 0,0662 \text{ [mm}^2\text{]}$$

4.3.2. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 66GF30 esetén

4.9. táblázat Kontakt zóna területértékei PA 66 GF30 esetén, mm² -ben

PA 66 GF30	f 0,1 [mm/ford]	f 0,2 [mm/ford]	f 0,4 [mm/ford]	f 0,6 [mm/ford]
1. mérés	0,229	0,312	0,585	0,783
2. mérés	0,208	0,326	0,559	0,892
3. mérés	0,187	0,302	0,56	0,752
4. mérés	0,219	0,323	0,556	0,719
5. mérés	0,207	0,331	0,593	0,76
6. mérés	0,212	0,365	0,579	0,784
7. mérés	0,208	0,324	0,614	0,72
8. mérés	0,236	0,354	0,575	0,716
ÁTL	0,21325	0,329625	0,577625	0,76575
SZÓRÁS	0,014069	0,019397	0,018533	0,054251



4.20. ábra Kontakt zóna területe az előtolás függvényében PA 66 GF30 anyag esetén

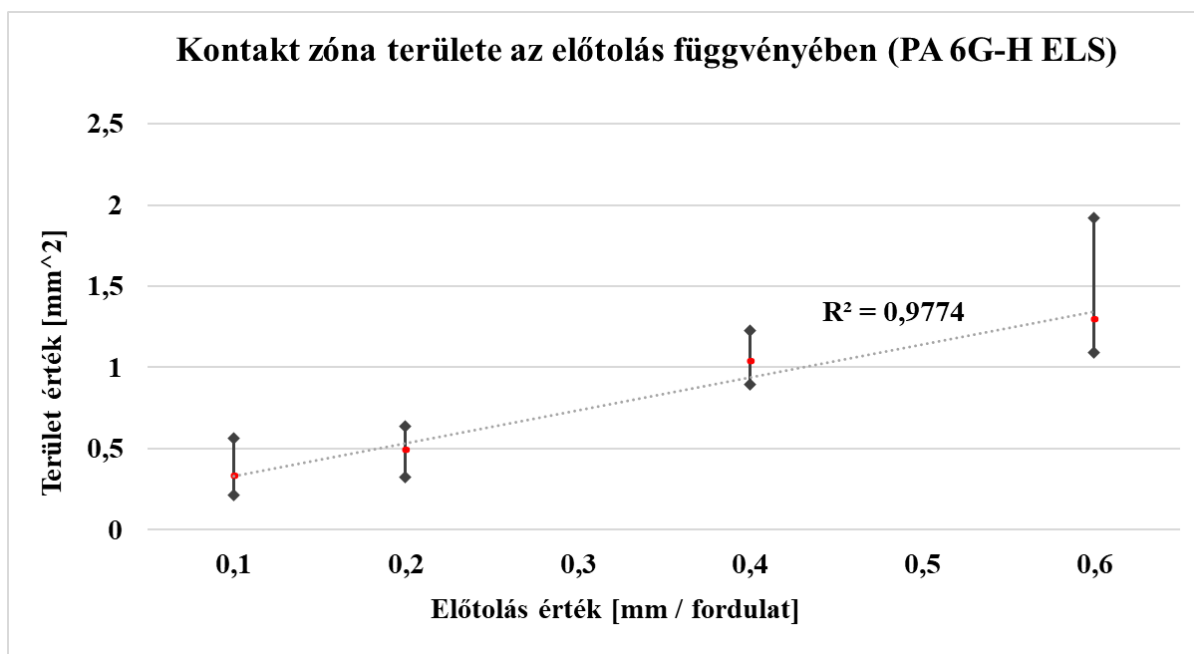
A 4.20. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

$$A_t(f) = 1,1167f + 0,1086 \text{ [mm}^2\text{]}$$

4.3.3. Kontakt zóna mérésének eredményei PA 6 G-H ELS esetén

4.10. táblázat Kontakt zóna területértékei PA 6G-H ELS esetén, mm² -ben

PA 6G-H ELS	f 0,1 [mm/ford]	f 0,2 [mm/ford]	f 0,4 [mm/ford]	f 0,6 [mm/ford]
1. mérés	0,241	0,483	1,027	1,921
2. mérés	0,566	0,546	0,941	1,37
3. mérés	0,264	0,325	1,216	1,16
4. mérés	0,392	0,569	1,116	1,124
5. mérés	0,214	0,437	0,915	1,236
6. mérés	0,401	0,639	1,225	1,204
7. mérés	0,238	0,37	0,896	1,09
8. mérés	0,34	0,545	0,962	1,264
ÁTL	0,332	0,48925	1,03725	1,296125
SZÓRÁS	0,111156	0,099424	0,124163	0,249926

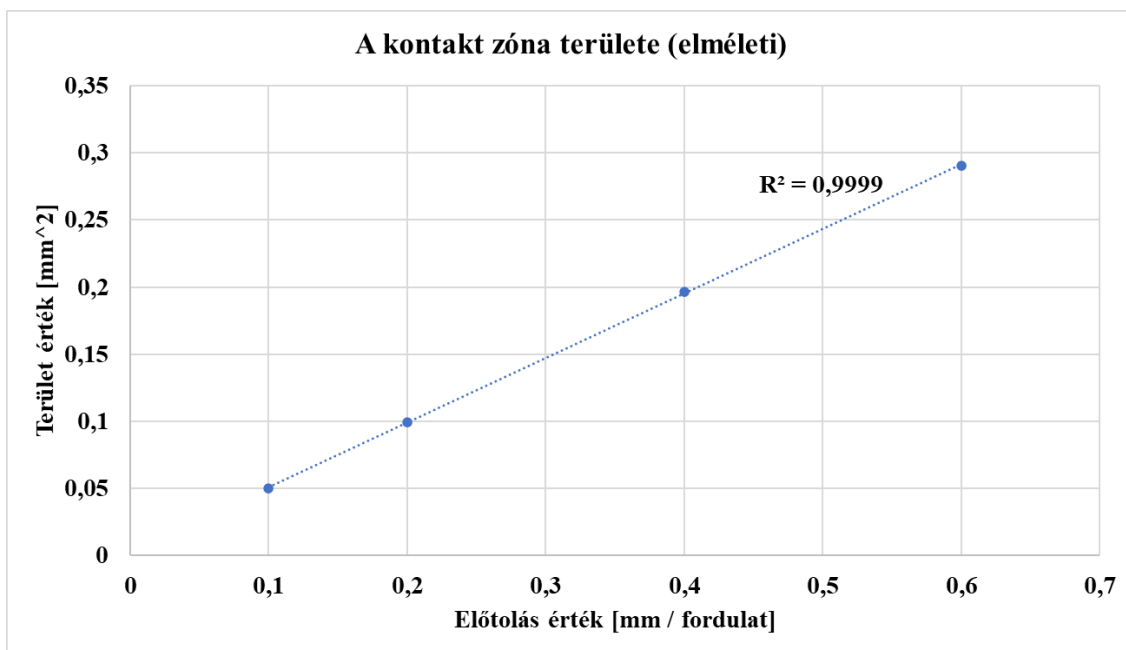


4.21. ábra Kontakt zóna területe az előtolás függvényében PA 6G-H ELS anyag esetén

A 4.21. ábra trendvonalának egyenlete a következő:

$$A_t(f) = 2,0229f + 0,1312 \text{ [mm}^2\text{]}$$

A trendvonalak lineárisak, mert lineáris függvény illeszkedett leginkább, azaz ebben az esetben volt a legmagasabb az R^2 szám. Ezen felül készítettem egy diagramot, melyben a lapka geometriáját, illetve az előtolás nagyságát figyelembe véve az elméleti kontakt zóna területét vizsgáltam. Ezt a diagramot ábraként mutatja a 4.22. ábra.



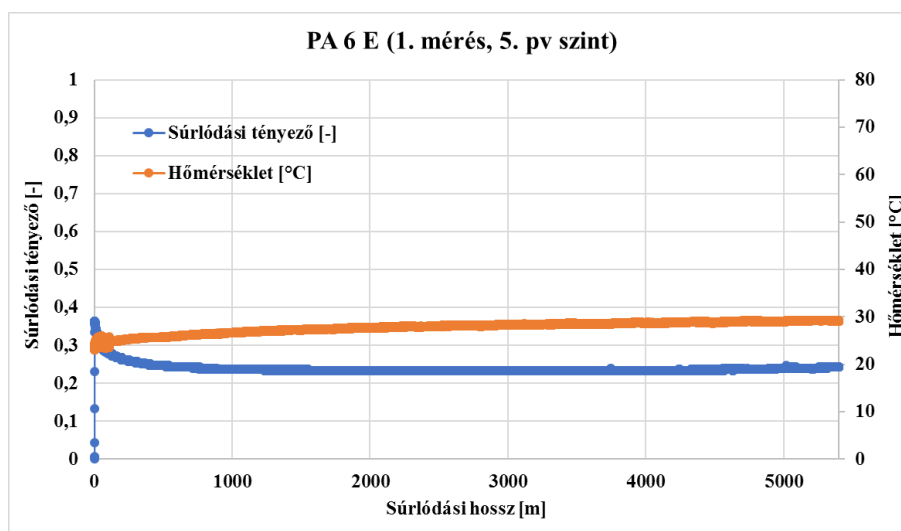
4.22. ábra Az elméleti kontakt zóna területének nagysága

Az ábrán látható, hogy a lineáris trendvonal 99,99%-ban pontos. A hiba a manuális számításaim során a kerekítésekből adódik.

Ezek alapján megállapítható, hogy a vizsgált tartományon belül (0,1-0,6 mm/fordulat előtolás) a kontakt zóna területének nagysága az előtolás értékétől lineárisan függ.

4.4. Tribológiai vizsgálatok eredményei

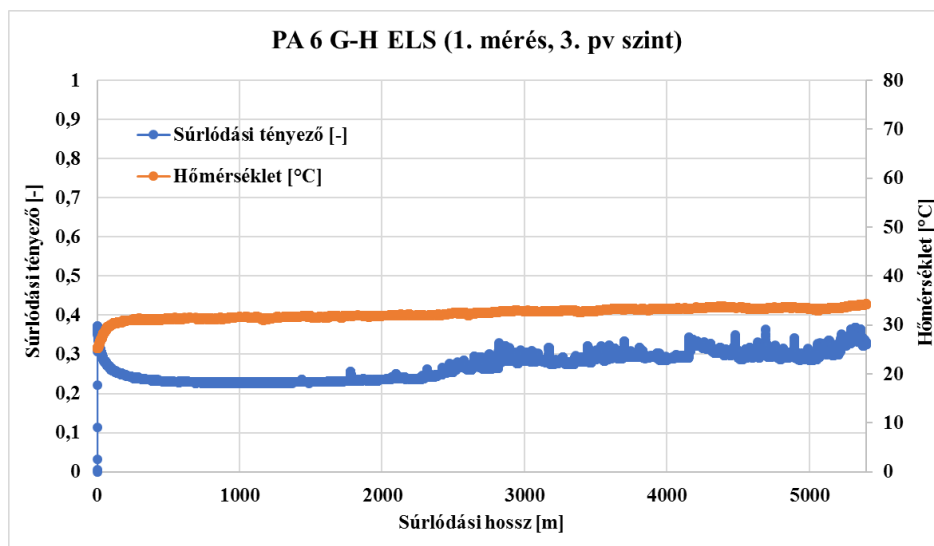
A 4.23. ábra példaként mutat egy tribológiai vizsgálat eredményeképp kapott diagramot. A diagramok címében helyet foglal a vizsgált polimer anyag neve, az ismétlés száma, illetve, hogy mely pv szinten történt a mérés (3.2. táblázat).



4.23. ábra Súrlódási tényező és hőmérséklet a súrlódási hossz függvényében PA 6 E esetén

A diagramon jól látható, hogy a hőmérséklet folyamatosan nő, míg a súrlódási tényező értéke egy kezdeti értékről csökken, majd közel konstans értéket vesz fel.

Egy másik példát szemléltet a 4.24. ábra.



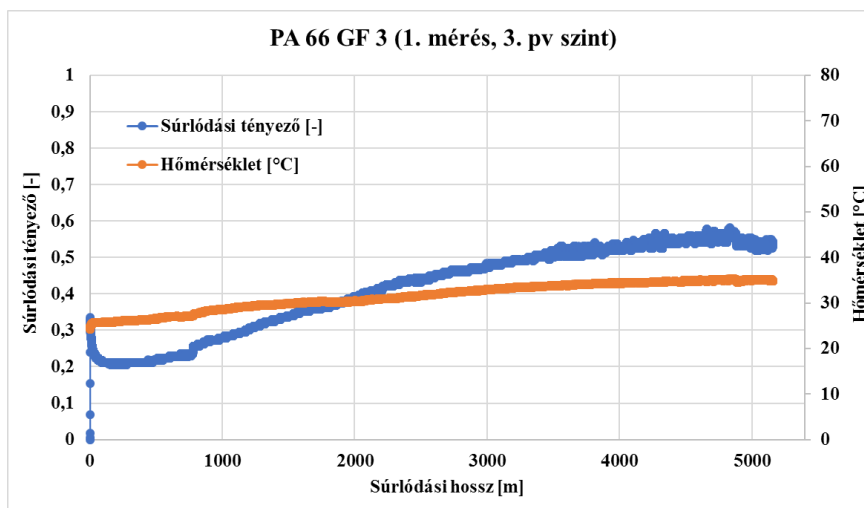
4.24. ábra Súrlódási tényező és hőmérséklet a súrlódási hossz függvényében PA 6G-H ELS esetén

Ebben az esetben szintén megfigyelhető a korábbi hőmérséklet-görbére tett megállapításom, viszont a súrlódási tényező görbéje eltérő. Mint korábban említettem az első néhány pont nem releváns. A valós kezdeti magas érték, illetve a csökkenő tendencia azonban ezen az ábrán is jelen van. Egy bizonyos súrlódási út megtétele után azonban súrlódási instabilitás figyelhető meg. A súrlódási instabilitásnak számos oka lehet, a két legvalószínűbb ok a deformáció, illetve az ellenfelület (tárca) felületére, azaz az érdességcsúcsok közé letapadó anyag. Ez az anyag az adhézió - mint fizikai jelenség – következtében rakódik le a kisebb keménységű anyagról, jelen esetben a próbatestről. Ahogy az érdességcsúcsok közei megtelnek, úgy az anyagpárosítás változik polimer-polimer anyagpárrá, mely rendszer így jóval kedvezőtlenebb tribológiai tulajdonsággal rendelkezik. A súrlódási erők így nőnek. Az adhézió azonban továbbra is jelen van, így ezt a letapadt réteget is leválasztja a próbatest és újra polimer-HC bevonat anyagpárról beszélhetünk.

Ez az adhéziós letapadás, majd leválás folyamatos, így a súrlódó rendszer instabillá válik. Az instabil szakaszban a folyamat nem kontrollálható, magas hőfejlődéssel, illetve komoly hangterheléssel jár. Nem ritka a súrlódó erők drasztikus lecsökkenése, vagy megemelkedése sem.

Egy újabb példát mutat a 4.25. ábra. Ennél az anyagnál, az anyaghoz tartozó 3. pv szinten korábban látható az adhézióból származó súrlódási instabilitás. Megfigyelhető, hogy egy bizonyos súrlódási hosszt követően a hőmérséklet-görbe is hirtelen emelkedni kezdett. Mivel a hőmérsékletet a próbatest palástfelületén mértem, így a hőmérséklet emelkedés látható „késésben” van a súrlódási tényező görbéjéhez képest. A rendszer adottságait figyelembe véve ez elfogadható.

A további súrlódási erő-diagramok az M9 mellékletben találhatók.



4.25. ábra Súrlódási tényező és hőmérséklet a súrlódási hossz függvényében PA 66 GF30 esetén

A többi diagramon, melyek nem kerültek bemutatásra, hasonló szakaszok figyelhetők meg. Az első néhány mérési pontot figyelmen kívül hagyva egy viszonylag magas kezdeti súrlódási erő, csökkenés, közel állandósult állapot, majd adhéziótól függően instabil szakasz.

Az instabil szakaszokkal a továbbiakban nem foglalkoztam. Számos összetevőtől függ, melyek vizsgálatára jelen kutatásom nem terjed ki.

4.4.1. A függvényillesztés eredményei

Az előzőekben bemutatott diagramokon látható, hogy a kezdeti magas súrlódó erőt egy csökkenő szakasz követ, mely majdnem minden esetben azonos jellegű. Ezeket a szakaszokat vizsgálva megállapítottam, hogy negatív exponenciális függvénnyel jól közelíthető a súrlódási erő alakulása a súrlódási hossz függvényében. A továbbiakban a súrlódási tényező vizsgálata helyett a súrlódási erőt vizsgáltam. A két tényező jellege hasonló, hiszen csupán egy konstans osztó (F_N) a különbség a két tényező között.

Megállapítottam tehát, hogy a súrlódó erő a stabil szakaszokon az alábbi függvénnyel jól közelíthető, a súrlódási úthossz függvényében:

$$F_s(s) = A + B * e^{-C*s}$$

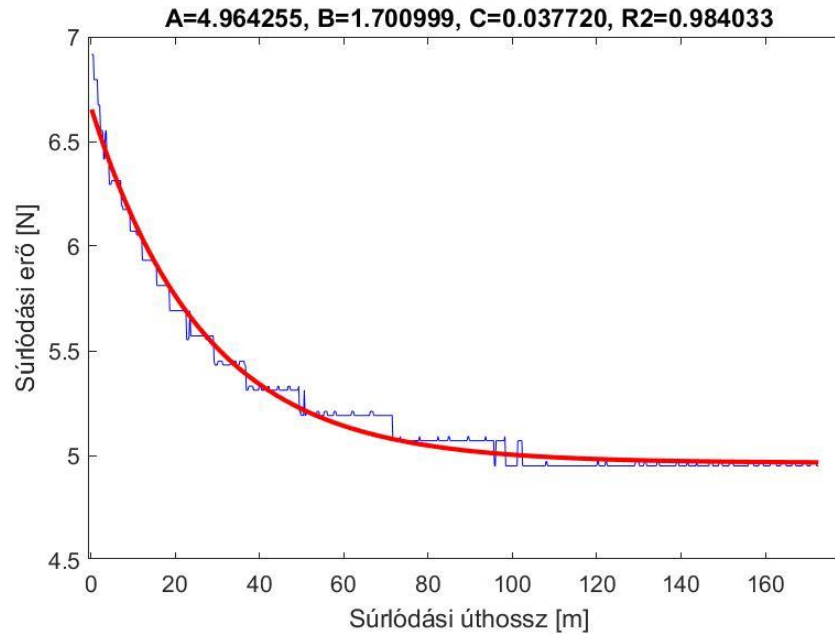
„A”, „B” és „C” a függvény együtthatóinak értékei

Az együtthatók fizikai jelentőséggel bírnak. Az „A” jelenti azt a súrlódási erő értéket, amelyre a függvény alapján a súrlódó rendszer beáll (vagy beállna) az állandósult állapotban. A „B” jelenti a kezdeti érték és az állandósult érték különbségét, a „C” pedig az állandósult állapot elérésének mértékét jelenti, súrlódási hosszal kifejezve, azaz, hogy milyen hosszúságú úton következik be az állandósult állapot.

Megjegyzem, voltak esetek, amikor a súrlódási instabilitás viszonylag rövid súrlódási hossz megtétele után következett. Ebben az esetben szintén a fent említett függvényt illesztettem, noha állandósult állapot nem volt, vélhetően az adhézió jelensége miatt.

A függvényillesztést a hőmérséklet adatokra is elvégeztem azzal a különbséggel, hogy ekkor telítődő exponenciális függvényt használtam, melyben a „C” együttható előjele pozitív. A továbbiakban ezeket az eredményeket nem ismertetem, hiszen a hőmérsékletmérés

módszerével nem tudok a kontakt zóna hőmérsékletére következtetni, csupán összehasonlíthatóság szempontjából vizsgálhatom a hőmérséklet változását. Ez a vizsgálat azonban jelen kutatásom tárgyát nem képezi.



4.26. ábra Függvénykeresés MATlab-ban (PA 66 GF 30 anyag, 1. mérés, 1. pv szint)

A 4.26. ábra egy függvénykeresési találatot mutat. A görbe a súrlódási erőt (F_s) ábrázolja a súrlódási hossz függvényében. Az ábra felső részén láthatók az együtthatók értékei, illetve az illeszkedésre vonatkozó R^2 szám. Látható, hogy a függvény 98, 4%-ban illeszkedik a mérési pontokra.

Elmondható, hogy az R^2 számok minden esetben 1-hez közeli értékek voltak.

A következőkben az így kapott eredményeket ismertetem táblázat formájában.

4.11. táblázat Együtthatók értékei PA 6 E esetén

PA 6 E					
A	B	C	Súrl. hossz [m]	pv érték [MPa·m/s]	Anyag/mérés
2,6446	1,159867	0,003557	1589,63	0,28993	PA 6 E 1.
3,83217	1,540106	0,003787	527,52	0,47844	PA 6 E 1.
4,38633	1,743436	0,00206	4247,1695	0,69024	PA 6 E 1.
5,243393	2,077856	0,002907	760,71	0,99420	PA 6 E 1.
6,077989	2,28371	0,004687	4231,86	1,28179	PA 6 E 1.
2,595021	1,058068	0,002535	1128,42	0,28993	PA 6 E 2.
3,888849	1,407156	0,00269	407,23	0,47844	PA 6 E 2.
4,360057	1,619705	0,001858	4231,13	0,69024	PA 6 E 2.
6,037273	1,998151	0,003792	895,18	0,99420	PA 6 E 2.
6,118592	2,389714	0,005812	4350,4	1,28179	PA 6 E 2.
2,54315	1,24041	0,002905	1254,37	0,28993	PA 6 E 3.
3,8	1,379626	0,0024	747,47	0,47844	PA 6 E 3.
4,394781	1,645176	0,002005	4229	0,69024	PA 6 E 3.
5,569322	1,762612	0,002819	749,96	0,99420	PA 6 E 3.
6,051787	1,966508	0,003903	4125,39	1,28179	PA 6 E 3.

A 4.11. táblázat az „A”, a „B” és a „C” együtthatókat szemlélteti PA 6 E esetén. Feltüntettem még a stabil súrlódó szakasz úthosszát is, melyeket a diagramokról nagyítás majd szemrevételezés alapján határoztam meg.

4.12. táblázat Együtthatók értékei PA 6G-H ELS esetén

PA 6G-H ELS					
A	B	C	Súrl. hossz [m]	pv érték [MPa·m/s]	Anyag/mérés
				0,30115	PA 6 G-H ELS 1.
6,517045	1,465458	0,013688	413,73	0,50508	PA 6 G-H ELS 1.
5,466535	2,026252	0,011277	1369,96	0,76104	PA 6 G-H ELS 1.
5,049104	2,406122	0,011772	1001,14	1,02448	PA 6 G-H ELS 1.
6,030251	2,850991	0,01031	1201,73	1,26582	PA 6 G-H ELS 1.
9,328087	0,596609	0,004083	357,5	0,30115	PA 6 G-H ELS 2.
6,800718	1,371292	0,007203	420,8	0,50508	PA 6 G-H ELS 2.
5,98065	1,812768	0,007943	1272,08	0,76104	PA 6 G-H ELS 2.
4,852316	2,32065	0,007159	1241,51	1,02448	PA 6 G-H ELS 2.
5,85691	2,493166	0,007447	1104,68	1,26582	PA 6 G-H ELS 2.
9,452596	0,621634	0,005566	357,13	0,30115	PA 6 G-H ELS 3.
6,42713	1,577507	0,011219	281,44	0,50508	PA 6 G-H ELS 3.
5,139574	1,871682	0,007395	958,73	0,76104	PA 6 G-H ELS 3.
5,002631	2,001295	0,007586	885,93	1,02448	PA 6 G-H ELS 3.
6,052568	2,405352	0,009269	1076,13	1,26582	PA 6 G-H ELS 3.

A 4.12. táblázat első sora hiányos az első mérésnél. Ez azért van, mert ebben az esetben a súrlódási erő görbe folyamatosan növekvő tendenciát mutatott és nem lehetett ráilleszteni a

függvényt. Mivel az ismétléseknél nem ez volt a jellemző, így ezeket a mérési adatokat nem vettem figyelembe.

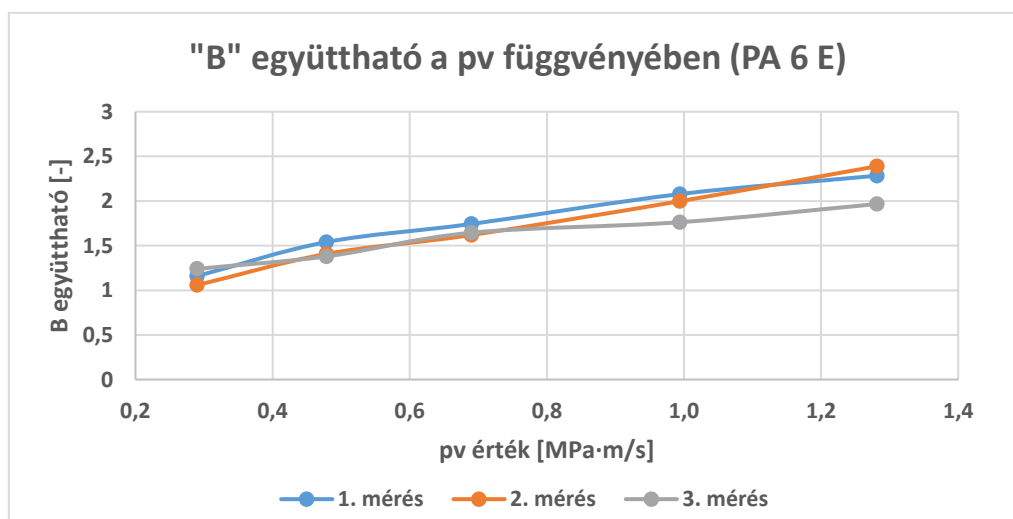
4.13. táblázat Együtthatók értékei PA 66 GF30 esetén

PA 66 GF30					
A	B	C	Súrl. hossz [m]	pv érték [MPa·m/s]	Anyag/mérés
4,964249	1,701006	0,037721	172,58	0,42785	PA 66 GF30 1.
4,772312	2,0767	0,034375	329,71	0,76784	PA 66 GF30 1.
4,773166	2,077243	0,034441	335,63	1,08072	PA 66 GF30 1.
				1,54248	PA 66 GF30 1.
8,643635	4,712153	0,09932	134,25	2,01687	PA 66 GF30 1.
4,971782	1,445241	0,029562	228,82	0,42785	PA 66 GF30 2.
4,620791	2,051452	0,020704	460,24	0,76784	PA 66 GF30 2.
4,565821	2,59557	0,024428	462,44	1,08072	PA 66 GF30 2.
6,130622	2,650531	0,047056	21,6	1,54248	PA 66 GF30 2.
8,577552	4,04755	0,059565	158,99	2,01687	PA 66 GF30 2.
4,919466	1,373158	0,025425	212,35	0,42785	PA 66 GF30 3.
4,541567	2,526682	0,027863	306,41	0,76784	PA 66 GF30 3.
4,514834	2,393073	0,028359	356,99	1,08072	PA 66 GF30 3.
7,037112	3,057164	0,052922	15,95	1,54248	PA 66 GF30 3.
8,559888	3,770549	0,063909	143,12	2,01687	PA 66 GF30 3.

A 4.13. táblázat 4. sora szintén a korábban említett okok miatt hiányos.

4.5. A regressziós vizsgálatok eredményei

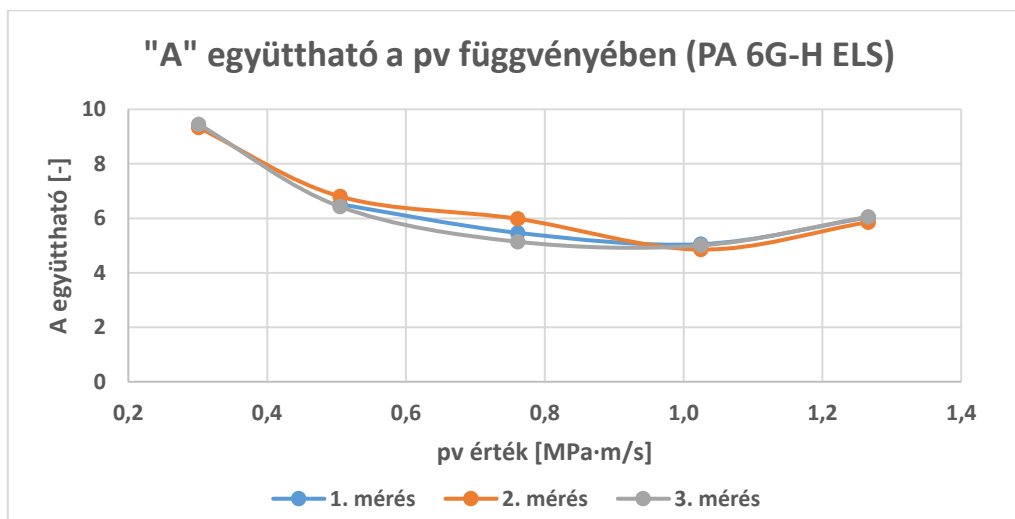
Az együtthatók értékeit anyagonként ábrázoltam diagramok formájában a pv érték függvényében. Példaként anyagonként egy együttható ábrázolásának diagramját mutatom be. A további ábrák az M10 mellékletben láthatók.



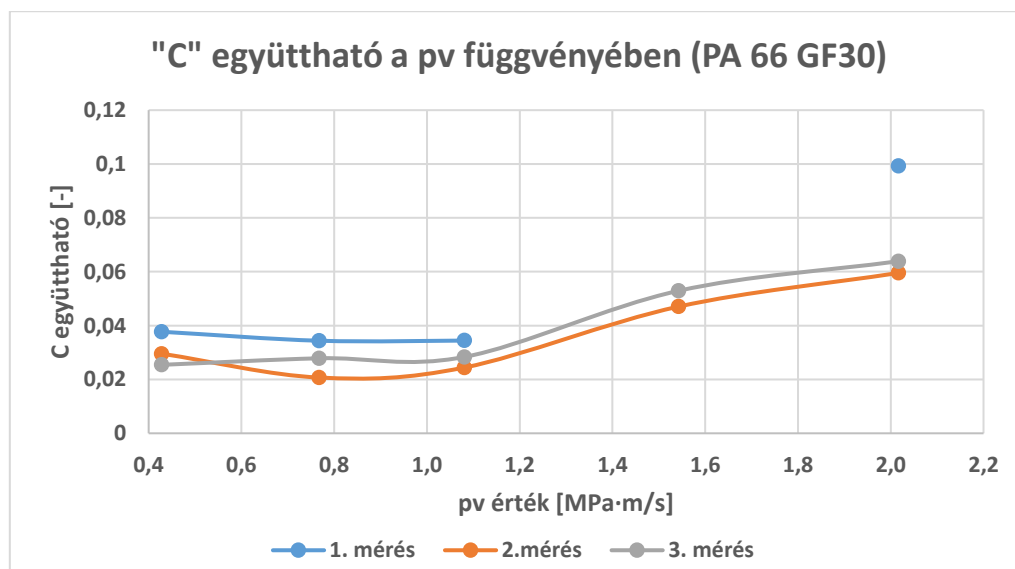
4.27. ábra „B” együttható ábrázolása a pv függvényében PA 6 E esetén

A 4.27. ábra mutatja „B” ábrázolását a pv függvényében. A különböző színek a különböző mérési ismétléseket jelölik. Az ábra alapján sejthető, hogy a „B” együttható lineárisan függ a pv értéktől. Ez mindhárom anyag esetén igaz.

A 4.28. ábra az „A” együtthatót ábrázolja a pv függvényében PA 6G-H ELS esetén. A diagram alapján sejthető, hogy a kapcsolatot egy másodfokú polinom írja le. Ezt szintén mindhárom anyagnál tapasztaltam.



4.28. ábra „A” együttható ábrázolása a pv függvényében PA 6G-H ELS esetén



4.29. ábra „C” együttható ábrázolása a pv függvényében PA 66 GF30 esetén

A 4.29. ábra a „C” konstans mutatja a pv függvényében PA 66 GF30 esetén. Sejthető, hogy szintén egy másodfokú polinom függvény írja le az függvényt. Ez a PA 6G-H ELS anyagot kivéve igaz volt. Látható, hogy néhány adat hiányzik. Ez a korábban említett adattisztítás eredménye.

Az F próba esetén p értéke minden esetben 0,01 és 0,02 között volt, azaz a regressziós vizsgálat releváns.

A regressziós vizsgálatok eredményei a következők:

„A” együttható pv értéktől való függését egy másodfokú polinom írja le. PA 6 E esetén a függvény:

$$A(pv) = 0,843 + 6,907pv - 2,192pv^2$$

PA 6G-H ELS esetén a függvény:

$$A(pv) = 14,086 - 19,388pv + 10,271pv^2$$

PA 66 GF30 esetén a függvény:

$$A(pv) = 6,043 - 3,865pv + 2,57pv^2$$

„B” együttható lineárisan függ a pv értéktől. PA 6 E esetén a függvény:

$$B(pv) = 0,908 + 1,04pv$$

PA 6G-H ELS esetén a függvény:

$$B(pv) = 0,375 + 1,825pv$$

PA 66 GF30 esetén a függvény:

$$B(pv) = 0,946 + 1,409pv$$

„C” együttható pv értéktől való függését szintén egy másodfokú polinom írja le. PA 6 E esetén a függvény:

$$C(pv) = 0,005 - 0,008pv + 0,006pv^2$$

PA 6G-H ELS esetén a regressziós vizsgálat eredménye sikertelen volt, ugyanis a pontokra nem illeszkedett a függvény megfelelően, azaz $R^2 < 0,95$ volt.

PA 66 GF30 esetén a függvény:

$$C(pv) = 0,021 + 0,1pv^2$$

A felírt összefüggések egy esetet kivéve 1-hez közeli R^2 számokat eredményeztek. Fontos megjegyezni, hogy PA 6 E esetén az „A” együtthatóra lineáris összefüggést is fel lehet írni, azonban a kvadratikus regressziós vizsgálat jobb eredményekre vezetett (magasabb R^2 szám).

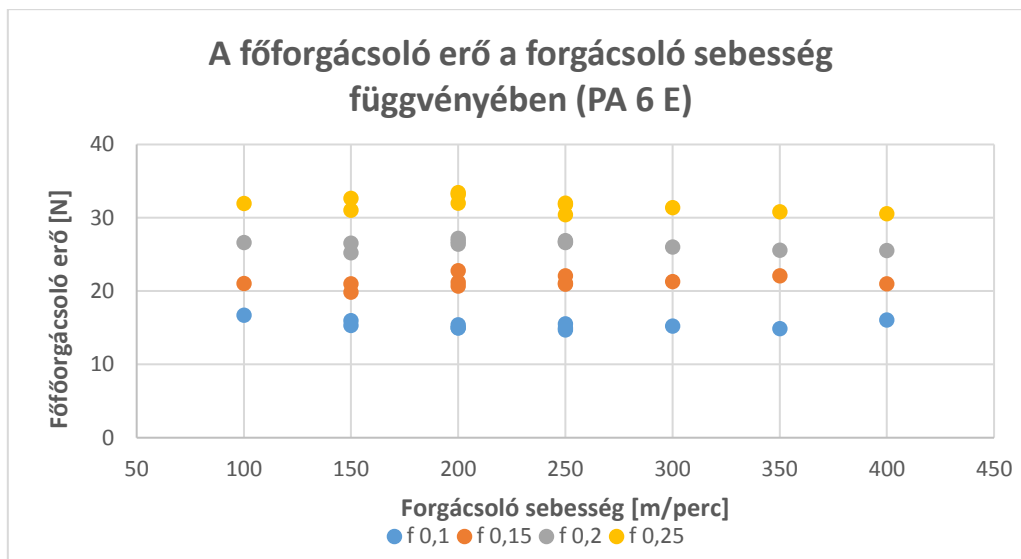
4.6. Új tudományos eredmények

Forgácsolási kísérleteim (NCT EUROturn 12-B szerszámgép és E 400 egyetemes esztergagép, sík homlokfelületű CCGW09T304FST típusú, KD1425 osztályú polikristályos gyémánt bevonatú eszterga lapka, késszáron elhelyezett nyúlásmérők, Leonova Diamond DIA-300 rezgésdiagnosztikai eszköz, SLD-144S rezgésmérő egység, BMS 764595 digitális kamera) alapján az alábbi új eredményeket tártam fel a szerszám és munkadarab kapcsolatában.

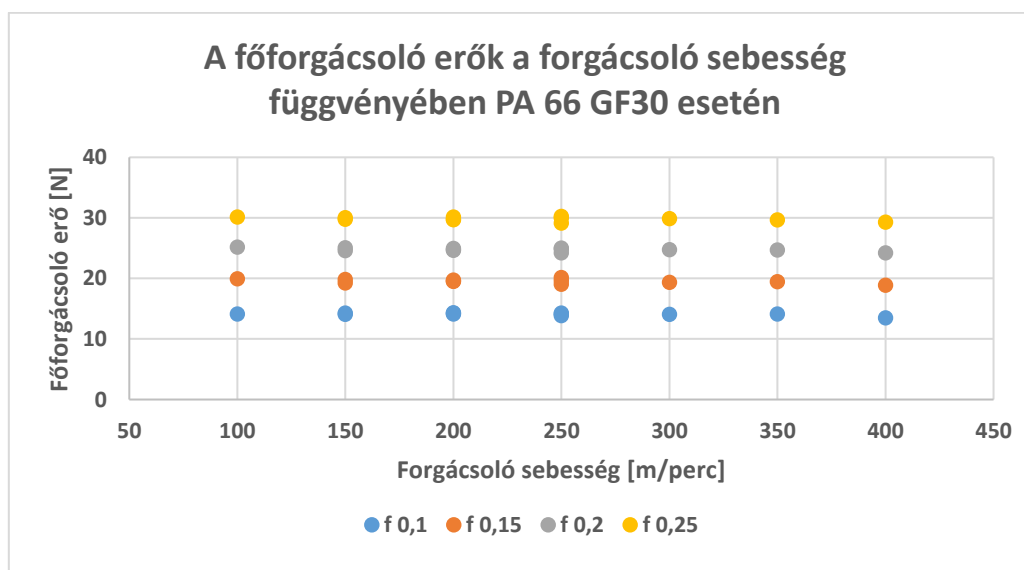
1. Tézis:

Méréseimmel igazoltam, hogy a vizsgált műszaki polimerek esztergálása esetén (PA 6 E, PA 66 GF 30 és PA 6 G-H ELS), adott fogásmélységnél (0,5 mm), különböző előtolásoknál (0,1; 0,15; 0,2; és 0,25 mm/fordulat), változó főorsó fordulatszámok (780 - 1680 1/perc tartományban) és az aktuális megmunkálási átmérőtől függő különböző forgácsoló sebességek (150-400 m/perc) esetén, valamint átlagosan 0-0,4 mm/s rezgéssebesség tartományban **a főforgácsoló erő nem függ a forgácsoló sebességtől** (4.30. Ábra, 4.31. Ábra és 4.32. Ábra.).

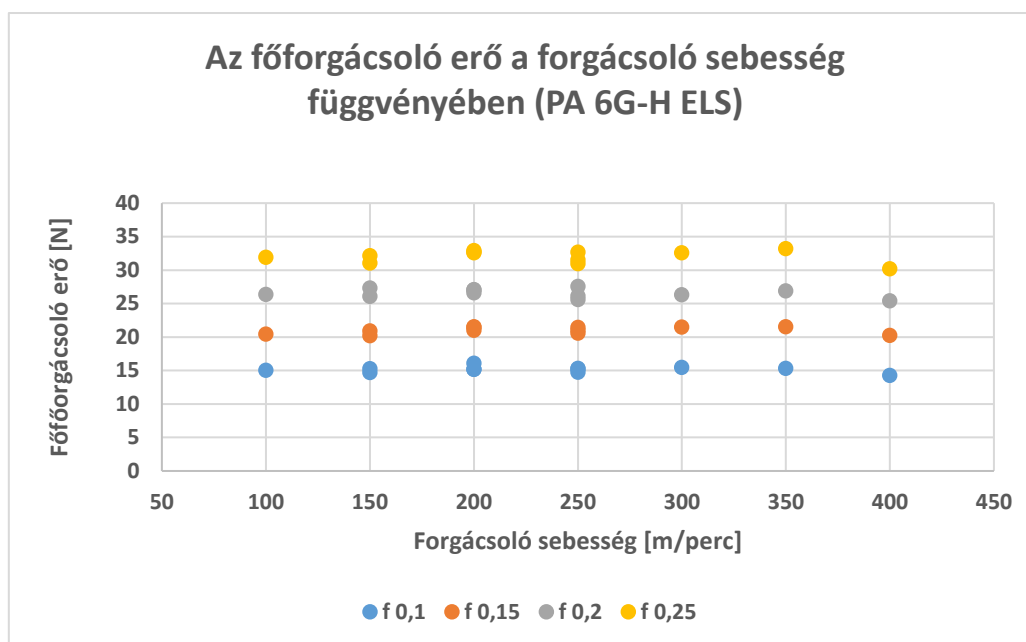
A függőség azért nem áll fenn, mert az említett beállított forgácsolási paramétereket alkalmazva a szerszámcúcsnál lokálisan nem keletkezik annyi hő, hogy az befolyásolja a főforgácsoló erőt. Megjegyzés: az ábrákon látható pontok az ismételt mérések számtani közepeit mutatja.



4.30. Ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 6 E anyag esetén



4.31. Ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 66 GF30 anyag esetén



4.32. Ábra Főforgácsoló erő és forgácsoló sebesség kapcsolata PA 6G-H ELS anyag esetén

2. Tézis

Méréseimmel igazoltam, hogy a vizsgált műszaki polimerek esztergálása esetén (PA 6 E, PA 66 GF 30 és PA 6 G-H ELS), adott fogásmélységnél (0,5 mm), különböző előtolásoknál (0,1-0,6 mm/fordulat tartományban), adott főorsó fordulatszám (530 1/perc), a kontakt zóna nagysága lineárisan függ az előtolás nagyságától (4.19, 4.20, 4.21 ábra).

A forgácsolási folyamat egyszerűsített tribológiai modelljeként, Pin-on-Disc rendszerben (DIN 50322, VI. vizsgálati kategória) az alábbi megállapításokat tettem méréseim alapján (PA 6 E, PA 6G-H ELS és PA 66 GF30 anyagú „pin” és HC (Hard Carbon) bevonatú „disc” felület, száraz súrlódás, 0,3-2,01 pv érték tartományon, 0,23-1,2 N amplitúdójú és 13-28 Hz frekvenciájú rezgéssel módosított normálterhelés esetén)

3. Tézis

A polimer anyagminták és HC (Hard Carbon) bevonatolású felület száraz súrlódása kapcsán megállapítottam, hogy a stabil súrlódást – „steady-state” – egy súrlódási instabilitási szakasz követ, mely hanghatással és instabil súrlódás növekedéssel jár. A stabil súrlódási út hossza függ az alkalmazott anyagpárosítástól és pv szinttől. A natúr PA 6 E esetén a növekvő pv szint hosszabb és alacsonyabb súrlódású steady-state szakaszt eredményezett, míg a kompozitok esetében eltérő trend fogalmazható meg. A stabil súrlódási szakasz jó közelítéssel írható le a

$$F_s(s) = A + B * e^{-C*s}$$

függvényalakkal, ahol F_s a súrlódási erő [N], s a súrlódási úthossz [m], A együttható a közel állandósult súrlódási erő értéket, B együttható a kezdeti érték és az állandósult érték különbségét, C együttható pedig a súrlódási erő csökkenésének mértékét jelenti.

4. Tézis

Vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a súrlódási függvény

$$F_s(s, pv) = A(pv) + B(pv) * e^{-C(pv)*s}$$

alakú függvénnyel írható le, ahol az A, B és C együtthatók közül B lineárisan függ a pv-től, továbbá A és C másodfokú polinomja a pv értéknek.

A függvényben szereplő tagok:

F_s : súrlódási erő [N],

s: súrlódási úthossz [m],

pv: felületi nyomás [MPa] és súrlódási sebesség [m/s] szorzata

A: közel állandósult érték együtthatója,

B: kezdeti érték és az állandósult érték különbségének együtthatója,

C: a függvény csökkenésének mértékére vonatkozó együttható.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatómunkám során a forgácsolási vizsgálataimmal kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, melyek hasznos információval szolgálnak a műszaki gyakorlat számára. Megállapítottam, hogy az általam beállított peremfeltételek mellett a forgácsoló sebességnek nincs befolyásoló hatása a főforgácsoló erőre, holott ismert, hogy bizonyos tartományokon a forgácsoló sebesség egy meghatározó paraméter. Ez a tény is azt mutatja, hogy a polimerek és kompozitok forgácsolásának, illetve tribológiájának területe még számos újdonságot rejt.

Ahhoz, hogy a forgácsolási folyamat tribológiájának teljes megismeréséhez egy lépéssel közelebb kerüljünk, megállapítást tettem a szerszám és a munkadaraból levált forgács érintkező felületének nagyságának kapcsolatáról, azaz a tribológiai kontakt zónáról.

A súrlódó rendszerek egyik fontos jellemzője a rezgés jótékony, vagy épp kártékony hatása a súrlódásra. A rezgések súrlódó rendszerekre gyakorolt hatására vonatkozó kutatások mai napig korlátozott számban állnak rendelkezésre, holott, ahol különböző elemek mozognak, esetleg érintkeznek egymással, ott rezgés keletkezik. Nincs ez másképp a forgácsolásnál sem, ahol a rezgésnek számtalan forrása lehet, mint például a megmunkáló gép működéséből adódó rezgései, vagy éppen a munkadarab keltette rezgések, melyek a szerszámra hatnak. Mindezeket figyelembe véve forgácsolási vizsgálataimat kiegészítettem rezgésméréssel, majd az eredményeket felhasználtam tribológiai vizsgálataim bemeneti paramétereiként.

Egy rezgést biztosító ún. vibrációs egységet terveztem és így egy külső forrásból biztosított, hozzáadott rezgéssel egészítettem ki tribológiai vizsgálataimat, valamint biztosítottam a közel megegyező anyagpárosítást. A főbb kimeneti eredmények a súrlódó erők és az ezekből számított súrlódási tényező, illetve a hőmérséklet voltak, melyeket a kontakt zóna közelében mértem.

Megállapítottam, hogy a súrlódó erők a megtett súrlódási úthossz függvényében változnak, és a függvényillesztés módszerét használva felírtam egy általános összefüggést, mely alapján ez a változás leírható a súrlódás stabil szakaszában. Az összefüggésben helyet foglaló együtthatók vizsgálatát elvégeztem, és megállapítottam, hogy jó közelítéssel ($R^2 > 0,95$) az együtthatók kapcsolata a p_v értékkel lineáris vagy másodfokú polinomok.

Javaslom olyan összefüggések feltárását, melynél a tribológiai vizsgálatok eredménye közvetlen információkat tartalmaz a forgácsolási vizsgálatok optimált bemenő paramétereit illetően.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

POLIMER KOMPOZITOK FORGÁCSOLÁSÁNAK TRIBOLÓGIÁJA

A műszaki gyakorlat napjainkban számos területen alkalmaz polimereket, vagy valamilyen polimer kompozitot. Fémekkel szembeni előnyös tulajdonságaik közé sorolható például a kiváló tömeg-szilárdság arány, mely olyan alkalmazásokat nyit meg a gyakorlat számára, amelyek eddig kivitelezhetetlenek voltak. A műszaki polimerek és kompozitok szintén előnyös tulajdonságai a viszonylag alacsony ár és könnyű megmunkálhatóság. Megmunkálás során azonban gyakran tapasztalhatunk folyó forgácsot, nem megfelelő megmunkált felületi minőséget, szerszámra tapadt anyagot stb.

A szerszám és a munkadarab közötti kapcsolatról keveset tudunk, főleg, ha a munkadarab anyaga valamilyen polimer. A megfelelő kapcsolat ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy a megmunkálás hosszú távon gazdaságos, a végeredmény pedig kielégítő legyen.

A szerszám homlokfelülete és a levált forgács kölcsönhatása eddig nem ismert tribológiai rendszer. Kutatásom erre a speciális területre irányul, kiegészítve tribológiai vizsgálatokkal, melyek tartalmazzák a minden forgó mozgás során jelenlévő jelenséget, a rezgést.

A forgácsolás és a tribológiai modellvizsgálatok közötti kapcsolat megismerése céljából egyélű szerszámmal történő esztergálási vizsgálatokat és tribológiai kisminta modellvizsgálatokat végeztem. Az esztergálási vizsgálatok során rezgésméréssel egészítettem ki az erőmérést és az így kapott eredmények adták tribológiai vizsgálataim bemeneti paramétereit.

Forgácsolási vizsgálataim közben új eredményeket véltem felfedezni a forgácsolási sebességre, illetve a szerszám és a munkadarab közötti tribológiai kontakt zónára vonatkozóan. A kontakt zóna nagysága, a főforgácsoló erő és a forgácsoló sebesség együtt alkotják a tribológiában nagy jelentőséggel bíró számot, a p_v értéket, mely egy súrlódó rendszerben a felületi nyomás és a súrlódási sebesség szorzata.

Tribológiai vizsgálataim során megállapítottam a stabil súrlódás tartományában a súrlódó erőt leíró összefüggést a súrlódási úthossz függvényében, mely a megfelelő p_v tartományban a kezdeti szakaszt és az állandósult állapotot foglalja magába.

Ezekre a szakaszokra függvényt illesztettem és az összefüggésben lévő együttthatókat a legkisebb négyzetek módszerével vizsgáltam.

Megállapítottam az összefüggéseket anyagonként, és felírtam a stabil súrlódási szakaszokra vonatkozó kétváltozós (p_v , valamint súrlódási úthossz) függvényeket a súrlódó erőre vonatkozóan.

Kutatásom eredményei felhasználhatók a vizsgált anyagpárosítások esetén, melynek lényege, hogy a súrlódási erők általános megadása mellett tudomást szerezhünk a stabil súrlódási állapot bejáratódási szakaszában keletkező súrlódó erőkről is.

7. SUMMARY

TRIBOLOGY OF MACHINING OF POLYMER COMPOSITES

Today, technical practice uses polymers or polymer composites in many areas. Their advantageous properties over metals include, for example, an excellent mass-to-strength ratio, which opens applications that were previously unfeasible. Engineering polymers and composites also have the advantage of being relatively inexpensive and easy to machine. However, machining often results in flowing chips, improper machined surface quality, material adhered to the tool, etc.

The relationship between the tool and the workpiece is poorly understood, especially if the workpiece is made of a polymer. Knowing the correct relationship is essential to ensure that machining is economical in the long term and that the result is satisfying.

The interaction between the tool face and the removed chip is an unknown tribological system. My research is focused on this specific area, complemented by tribological studies that include the phenomenon present in all rotary motion, vibration

In order to understand the relationship between machining and tribological model tests, I carried out single-edge turning tests and tribological small sample model tests. During the turning tests, I supplemented the force measurements with vibration measurements and the results obtained provided the input parameters for my tribological tests.

During my machining tests, I discovered new results concerning the cutting speed and the tribological contact zone between the tool and the workpiece. The area of the contact zone, the main cutting force and the cutting speed together form the number p_v , which is an important quantity in tribology and is the product of the surface pressure and the friction velocity in a frictional system.

In my tribological investigations, I have established a relationship describing the frictional force as a function of the friction path length in the stable friction range, which includes the initial stage and the steady state in the corresponding p_v range.

I fitted a function to these sections and tested the independent variables in the relationship using the least squares method.

I established the correlations for each material and plotted the bivariate functions (p_v and friction path length) for the frictional force on the stable friction stages.

The results of my research can be applied to the material pairings under investigation, the idea being that, in addition to the general frictional forces, we can also obtain information about the frictional forces generated during the initial phase of the stable friction stage

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. A. A. Cenna, P. Mathew, Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 105–113, 2002.
2. A. S. Adnan, S. Subbiah, Experimental investigation of transverse vibration-assisted orthogonal cutting of AL-2024, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 50., pp. 294–302, 2010
3. C. Sommer, S. Sommer, *Complete EDM Handbook*, Advance Publishing, Houston, Texas, 2005.
4. Crawford, R.J., *Plastics Engineering*, Pergamon, NY, 1992
5. D. Xiong, S. Ge, Friction and wear properties of UHMWPE/Al₂O₃ ceramic under different lubricating conditions, *Wear*, Vol. 250, pp. 242-245, 2001
6. Dobrocsi Zoltán, *Műszaki műanyagok esztergálhatóságának kutatása*, Országos Tudományos Diákköri Dolgozat, 2011
7. Dömötör Ferenc, *Összetett szerkezetű járműanyagok (hibridek, kompozitok) határfelületei megmunkálási folyamatainak korszerű technológiai diagnosztikája*, Doktori disszertáció, 2013
8. E. W. Patten, D. V. Citters, M. D. Ries, A. Pruitt, Wear of UHMWPE from sliding, rolling, and rotation in a multidirectional tribo-system, *Wear*, Vol. 304, pp. 60-66, 2013
9. F. A. Lopez, M. A. Martin, F. J. Alguacil, Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass ceramic material, *J Anal Appl Pyrolysis*, Vol. 93, pp. 104–112, 2012.
10. Farkas Gabriella, *Esztergált műszaki műanyag felületek mikrotopográfiai jellemzői*, Ph.D értekezés, Gödöllő, 2010
11. G. DiPaolo, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials. *Journal of Engineering for Industry. ASME Transaction*, Vol. 118, pp. 104–110, 1996
12. G. H. Awan, L. Ali, K. M. Ghauri, Effect of various forms of glass fiber reinforcements on tensile properties of polyester matrix composite, *J Faculty Eng techno*, Vol. 16, pp. 33–39, 2009.

13. G. Urbikain, D. Olvera, L. N. López de Lacalle, A. Elías-Zúñiga, Spindle speed variation technique in turning operations: Modeling and real implementation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 383., pp. 384-396, 2016
14. G. Totis, M. Sortino, Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51., 2011
15. H. Jamshidi, M.J. Nategh, Theoretical and experimental investigation of the frictional behavior of the tool–chip interface in ultrasonic-vibration assisted turning, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 65., pp. 1–7, 2013
16. H. Ma, J. Wu, L. Yang, Z. Xiong, Active chatter suppression with displacement-only measurement in turning process, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 401., pp. 255-267., 2017
17. H. Puls, F. Klocke, D. Lung, Experimental investigation on friction under metal cutting conditions, *Wear*, Vol. 310, pp. 63-71, 2013
18. H. Unal and A. Mimaroglu, Friction and wear behaviour of unfilled engineering thermoplastics, *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 183-187, 2003
19. H. Unal, A. Mimaroglu, U. Kadioglu and H. Ekiz, Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions, *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 239-245, 2003
20. I. Bediaga, M. Zatarain, J. Munoa, R. Lizarralde, L. Norberto L. Lacalle, Application of continuous spindle speed variation for chatter avoidance in milling. Optimisation of speed variation parameters, 7th International CIRP Conference on High Speed Machining, May 2008, Darmstadt, Germany
21. I. I. Rubin, *Handbook of Plastic Materials and Technology*, ISBN 0-471-09634-2, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990
22. J. P. Davim, P. Reis, Multiple regression analysis (MRA) in modelling milling of glass fiber reinforced plastics (GFRP). *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 6, pp. 185–197, 2004.
23. J. Zeng, Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting, in M. Hashish (editor), *Proceedings of 2007 American WJTA Conference and Expo*, Houston, Texas, pp. 19–21, 2007.
24. J.C. Outeiroa, J.P. Costesa, J.R. Kornmeierb, Cyclic variation of residual stress induced by tool vibration in machining operations, *Procedia CIRP*, Vol. 8., pp. 493–497, 2013

25. K. A. Laux and C. J. Schwartz, Effects of contact pressure, molecular weight, and supplier on the wear behavior and transfer film of polyetheretherketone (PEEK), *Wear*, Vol. 297, pp. 919-925, 2012
26. Kalácska Gábor, 2007, *Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban*, 3C-Grafika Kft., Gödöllő, ISBN-10: 963-06-1566-5, 2007
27. Kári-Horváth Attila, *A forgácsolásnál alkalmazott minimálkenés (MMS) hatásmechanizmusa- és hatékonyságának növelése*, Doktori disszertáció, 2009
28. Keresztes Róbert Zsolt, *Műszaki műanyag/acél csúszópárok tribológiai kutatása*, Ph.D értekezés, Gödöllő, 2009
29. Kovács Róbert, *Műszaki Műanyagok Forgácsolásának Kutatása*, Tudományos Diákköri Dolgozat, Témavezetők: Dr. Keresztes Róbert, Sarankó Ádám, 2016
30. Kozma Mihály, *Tribológia*, Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, Műegyetemi kiadó, Budapest, 2001
31. M. Guezmil, W. Bensalah and S. Mezlini, Effect of bio-lubrication on the tribological behavior of UHMWPE against M30NW stainless steel, *Tribology International*, Vol. 94, pp. 550-559, 2015
32. M. Hashish, M. Hilleke, Water jet machining of composites and ceramics, in Jahanamir, S., Ramulu, M., Koshy, P. (eds), *Machining of Ceramics and Composites*. Marcel Dekker, New York, NY, 1998.
33. M. N. Kumar, S. K. Subbu, P. V. Krishna, A. Venugopal, Vibration Assisted Conventional and Advanced Machining: A Review, *Procedia Engineering*, Vol. 97., pp. 1577-1586, 2014
34. M. N. Subramanian, *Polymer Blends and Composites – Chemistry and Technology*, Scrivener Publishing, ISBN: 978-1-118-11889-4, 2017
35. M. Palabiyik and S. Bahadur Mechanical and tribological properties of polyamide 6 and high density polyethylene polyblends with and without compatibilizer, *Wear*, Vol. 246, pp. 149-158, 2000.
36. M. Ramulu, D. Kim, G. Choi, Frequency analysis and characterization in orthogonal cutting of glass fiber reinforced composites. *Composites: Part A*, Vol. 34, pp. 949–962, 2003
37. M. Siddhpura, R. Paurobally, A review of chatter vibration research in turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 61., pp. 27-47., 2012

38. M. Sumer, H. Unal, A. Mimaroglu, Evaluation of tribological behaviour of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions, *Wear*, Vol. 265, pp. 1061-1065, 2008
39. M. Ucar, Y. Wang, End-milling machinability of a carbon fiber reinforced laminated composite. *Journal of Advanced Materials*, Vol. 34, pp. 46–52, 2005.
40. Miskolczi Norbert, *Műanyagok kémiája és technológiája*, Pannon Egyetem, 2012
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_muanyagok_kemiaja/ch01.html
41. N. Ahmed, Ultrasonically assisted Turning: effects on surface roughness, *World Appl. Sci. J.* Vol. 27., pp. 201-206, 2013
42. P. Guo, K. F. Ehmann, An analysis of the surface generation mechanics of the elliptical vibration texturing process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 64., pp. 85-95, 2013
43. P. Janardhan, J. Sheikh-Ahmad, H. Cheraghi, Edge trimming of CFRP with diamond interlocking tools, in *Proceedings of Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference*, Toulouse France. ASE Publication 2006-01-3173, pp. 11–14 2006.
44. P. M. George, B. K. Raghunath, L. M. Manocha, A. M. Warriar, Modelling of machinability parameters of carbon–carbon composite – a response surface approach, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 153–154, pp. 920–924, 2004.
45. Pék Lajos, *Fémes és nemfémes szerkezeti anyagok*, Egyetemi jegyzet, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2010
46. R. Muhammad, N. Ahmed, A. Roy, V.V. Silberschmidta, Numerical modeling of vibration-assisted turning of Ti-15333, *Procedia CIRP*, Vol. 1. pp. 377–382, 2012
47. S. Erden, K. Sever, Y. Seki, Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification, *Fibers Polym*, Vol. 11, pp. 732–737, 2010.
48. S. J. Harris, G. G. Krauss, Improved technique for measuring the ball volume removed in a ball-on-disk test, *Tribology Letters*, Vol. 10, No. 3, 2000
49. S. Jian, D. C. H. Yang, Effects of federate and chisel edge on delamination in composites drilling. *Journal of Engineering for Industry*. ASME Transaction, Vol. 115, pp. 398–405, 1993.

50. S. Kim, K. Ahmadi, Estimation of vibration stability in turning using operational modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 130., pp. 315-332., 2019
51. S. Patil, S. Joshi, A. Tewari, S.S. Joshi, Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V, *Ultrason.* Vol. 54., pp. 694-705, 2014
52. S. Swain, I. Panigrahi, A. K. Sahoo, A. Panda, Study On Machining Performances During Hard Turning Process Using Vibration Signal Under MQL Environment: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18., pp. 3539-3545., 2019
53. S.L. Evans és P.J. Gregson, Composite technology in load-bearing orthopaedic implants, *Biomaterials*, Vol. 19, 1329–1342, 1998.
54. T. C. Sivarao, Y. Qumrul, M. A. Amran, T. J. S Anand, R. Izamshah, A. A. Aziz, Friction Performance Analysis of Waste Tire Rubber Powder Reinforced Polypropylene Using Pin-On-Disk Tribometer, *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 743-749, 2013
55. T. Jankowiak, A. Rusinek, G. List, G. Sutter and F. Abed, Numerical analysis for optimizing the determination of dynamic friction coefficient, *Tribology International*, Vol. 95, pp. 86-94, 2015
56. T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, J. Naveen, Glass fiber-reinforced polymercomposites – a review, *Reinforced Plastics & Composites*, Vol. 33(13), pp. 1258–1275, 2014.
57. V. Mahesi, S. Joladarashi, S. M. Kulkarni, A comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load, *Defence Technology*, Vol. 17, pp. 257-277, 2021
58. V. Zablotskyi, O. Dahnyuk, S. Prystupa, A. Tkachuk, Formation of Physical and Mechanical Properties of Surface Layer of Machine Parts, *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 2017
59. Valasek István, *A tribológia alapjai*, ISBN 963 00 8688 3, Tribotechnik Kft., Budapest, 2002
60. Valasek István, *Ipari tribológia*, ISBN 963 00 8693 X, Tribotechnik Kft., Budapest, 2003
61. X. Zhang, A.S. Kumar, M. Rahman, C. Nath, K. Liu, Experimental study on ultrasonic elliptical vibration cutting of hardened steel using PCD tools, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 211., pp. 1701–1709, 2011
62. Y. Wang, Z. Yin, H. Li, G. Gao, X. Zhang, Friction and wear characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites containing glass fibers and

- carbon fibers under dry and water-lubricated conditions, *Wear*, Vol. 380-381, pp. 42-51, 2017
63. Y.J. Mergler, R. P. Schaake, A. J. H. Veld, Material transfer of POM in sliding contact, *Wear*, Vol. 256, pp. 294-301, 2003
64. You Zhao, Youlong Zhao, S. Liang, G. Zhou (2015): A High Performance Sensor for Triaxial Cutting Force Measurement in Turning, *Sensors*, Vol. 15, doi:10.3390/s150407969
65. M. Fallah, B. Moetakef-Imani, Adaptive inverse control of chatter vibrations in internal turning operations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 129., pp. 91-111., 2019
66. Y. Liu, Z. Liu, Q. Song, B. Wang, Analysis and implementation of chatter frequency dependent constrained layer damping tool holder for stability improvement in turning process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 266., pp. 687-695., 2019

Internetes források

1. https://www.nct.hu/szerszamgepek/cnc_esztergagepek/ellenorsos (letöltve: 2016)
2. <https://www.productivity.com/wp-content/uploads/pdfs/Kennametal%20PCBN%20PCD%20Inserts%20-%20Master%20Catalog.pdf> (letöltve: 2021)
3. <https://quattroplast.hu/print/3331/properties> (letöltve: 2021)
4. <https://quattroplast.hu/print/3333/properties> (letöltve: 2021)
5. <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepeszet/gepeszeti-szakismeretek-3/esztergakesek-elgeometria/a-az-esztergakes-reszei> (letöltve: 2021)
6. https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0007_02-Forgacsolas_es_szerszamai_HU/51_esztergls.scorml (letöltve: 2021)
7. Jenei István és Ladányi Gábor, Kenésgazdálkodás, http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_kenesgazdalkodas/a_kopas_fajtai.html (letöltve: 2019)
8. https://www.researchgate.net/figure/Surface-micro-roughness-parameters-used-in-this-study-based-on-Handysurf-E35-B-manual_fig2_260592526 (letöltve: 2021)

9. <https://www.oerlikon.com/balzers/global/en/portfolio/balzers-surface-solutions/pvd-and-pacvd-based-coating-solutions/balinit/carbon-dlc-based/balinit-hard-carbon/>
(letöltve: 2021)

M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált cikk világnyelven

1. Odrobina M., **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2018): Tribological behaviour of electrically conductive and self-lubricating cast polyamide 6 composites, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 17, pp. 67-73. , 7 p., HU ISSN 2060-3789
2. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2019): Analysis of Vibration During Turning Process of Different Materials, International Journal of Engineering and Management Sciences/Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, Vol. 4 (1), pp. 200-205., 6 p. ISSN 2498-700X
3. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2019): Effect of sliding velocity and loads on friction coefficient and temperature in DLC and PA 6 contact in dry sliding conditions, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 18, pp. 34-42., 9 p. HU ISSN 2060-3789
4. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2022): Analysis of formed chips in the case of turning different polymer materials, Hungarian Journal Of Industry And Chemistry, Vol. 49 No. 2, pp. 71-75., 5 p. ISSN 2450-5102
5. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2018): New method for dynamic tribological test of engineering polymers, International Journal of Engineering and Management Sciences/Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, Vol. 3 (1), pp. 25-29., 5 p. ISSN 2498-700X
6. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G., Sukumaran J. (2017): Evaluation of cutting force of PA6 and POM C, Mechanical Engineering Letters: Research and Development, Vol. 15, pp. 27-34., HU ISSN 2060-3789
7. **Sarankó Á.**, Szakál Z., Kalácska G., Samyn P., Sukumaran J., Klébert Sz., Károly Z., (2018): Adhesion and sliding tribological properties of polyolefins treated by diffuse coplanar surface barrier discharges, Express Polymer Letters, Vol. 12 (11), pp. 972-985. , 14 p., ISSN 1788-618X, (IF: 2,875)

8. **Sarankó Á.**, Zsidai L., Keresztes R., Schrempf N. (2019): Force Measuring methods of milling and turning for experimental use – A brief review, *Mechanical Engineering Letters: Research and Development*, Vol. 19, pp. 208-218., 11 p. HU ISSN 2060-3789

Lektorált cikk magyar nyelven

9. Odrobina M., **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2017): Mezőgazdasági gépek polimer fogaskerekeinek terhelhetőségi vizsgálata I. rész, *Mezőgazdasági technika*, 58. évfolyam, 6. szám, 2-4. o, ISSN 0026-1890
10. Odrobina M., **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2017): Mezőgazdasági gépek polimer fogaskerekeinek terhelhetőségi vizsgálata 2. rész, *Mezőgazdasági technika*, 58. évfolyam, 7. szám, 2-5. o, ISSN 0026-1890
11. Szakál Z., Hayder A., Odrobina M., **Sarankó Á.** (2016): Extrudált PA 6 és POM C lemezanyagok ragasztott kötésének nyíróvizsgálata, *Műanyagipari Szemle*, 6. szám, 1-10. o. ISSN 1785-7856

Nemzetközi konferencia kiadvány

12. Keresztes R., Szakál Z., Kári-Horváth A., Pataki T., **Sarankó Á.** (2016): Tensile behaviour of adhesive overlap joints with PP, UHMW-PE, and PTFE polymers, *CEurSIS 2016: The International Conference of the Carpathian Euro-Region's Specialists in Industrial Systems*, 11th Edition - Proceedings, Vol. 2016, pp. 51-56. , 6 p. ISSN 1224-3264
13. **Sarankó Á.**, Kalácska G., Keresztes R. (2020): Comparison of S 235 steel and DLC coated steel using Pin-on-disc method in dry sliding conditions against PA 6 countersurface, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 749. 7 p., doi:10.1088/1757-899X/749/1/012024
14. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2016): Machining of engineering polymers, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference an Advances in Mechanical Engineering*, pp. 442-445., ISBN 978-963-473-944-9
15. **Sarankó Á.**, Keresztes R., Kalácska G. (2017): Developed polymer pin-on-disc test system for fatigue-sliding models, *International Multidisciplinary Conference*, 12th Edition, pp. 83-87., ISSN 1224-3264

Nemzetközi konferencia abstract

M3: Próbatetek anyagainak adatlapjai

PA 6 E műszaki adatlapja (quattroplast.hu, 2021)

Tulajdonság	Mértékegység	Vizsgálat	Érték
Alapszín			natúr (fehér)
Sűrűség	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	1.14
Éghetőségi fokozat UL94 szerint	-	DIN IEC 60695-11-10	HB
Vízfelvétel: telítettség levegőn, 24 h/96 h, (23°C)	%	DIN EN ISO 62	0.3/0.6
Dielektromos állandó	-	IEC 60250	3.9
Térfogati ellenállás	Ω*cm	IEC60093	10 ¹⁴
Felületi ellenállás	Ω	IEC60093	10 ¹⁴
Átütési szilárdság	kV/mm	IEC 60243	20
Dielektromos veszteségi tényező (50 Hz)	-	IEC60 250	0.02
Kúszóáram szilárdság, CTI	-	IEC 60112	600
Hővezetési tényező	W/ (K.m)	ISO 22007-4:2008	0.37
Vegyszerállóság 23°C -on: -gyenge sav		-	B*
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős sav		-	C*
Vegyszerállóság 23°C -on: - alifás szénhidrogének		-	A*
Vegyszerállóság 23°C -on: -klórozott oldószerek		-	B*
Vegyszerállóság 23°C -on: -alkoholok			A*
Vegyszerállóság 23°C -on: - gyenge lúg		-	A*
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős lúg		-	B - C*
Vegyszerállóság 23°C -on: -aromás szénhidrogének		-	A*
Olvadáspont	°C	ISO 11357-3	220
Üvegesedési hőmérséklet	°C	DIN 53765	45
Fajhő	J/(g.K)	ISO 22007-4:2008	1.7
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 60°C között	m/(m.K)x10 ⁻⁵	DIN EN ISO 11359-1;2	12
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 100°C között	m/(m.K)x10 ⁻⁵	DIN EN ISO 11359-1;2	13
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – rövid idejű	°C		160

8. Mellékletek

Tulajdonság	Mértékegység	Vizsgálat	Érték
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – tartós használatkor	°C		100
Alkalmazhatóság minimális hőmérséklete	°C		- 40
Hőalaktartósság (HDT)	°C	DIN EN ISO 75, A	75
Folyáshatár	MPa	DIN EN ISO 527-2	78
Húzó rugalmassági modulus	MPa	DIN EN ISO 527-2	3300
Szakadási nyúlás	%	DIN EN ISO 527-2	130
Hajlító szilárdság	MPa	DIN EN ISO 178	100
Charpy ütőszilárdság	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1eU	Nem törik
Húzó szilárdság	MPa	DIN EN ISO 527-2	79
Nyomó szilárdság	MPa	EN ISO 604 1%/2%	24/41
Charpy ütőszilárdság, hornyolt	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1eA	7
Golyóbenyomódásos keménység	MPa	ISO 2039-1	155
Shore D keménység	-	DIN EN ISO 868	75

(*) jelmagyarázat:

- A – alkalmazható
- B - korlátozottan alkalmazható
- C - nem alkalmazható

PA 66 GF30 műszaki adatlapja (quattroplast.hu, 2021)

Tulajdonság	Mértékegység	Vizsgálat	Érték
Alapszín			fekete
Sűrűség	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	1.34
Éghetőségi fokozat UL94 szerint	-	DIN IEC 60695-11-10	HB
Vízfelvétel: telítettség levegőn, 24 h/96 h, (23°C)	%	DIN EN ISO 62	0.1/0.2
Dielektromos állandó	-	IEC 60250	
Térfogati ellenállás	Ω*cm	IEC60093	10 ¹⁴
Felületi ellenállás	Ω	IEC60093	10 ¹⁴
Átütési szilárdság	kV/mm	IEC 60243	
Dielektromos veszteségi tényező (50 Hz)	-	IEC60 250	
Kúszóáram szilárdság, CTI	-	IEC 60112	
Hővezetési tényező	W/ (K.m)	ISO 22007-4:2008	0.39
Vegyszerállóság 23°C -on: -gyenge sav		-	B*
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős sav		-	C*

8. Mellékletek

Tulajdonság	Mértékegység	Vizsgálat	Érték
Vegyszerállóság 23°C -on: - alifás szénhidrogének		-	A*
Vegyszerállóság 23°C -on: -klórozott oldószerek		-	B*
Vegyszerállóság 23°C -on: -alkoholok			A*
Vegyszerállóság 23°C -on: - gyenge lúg		-	A*
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős lúg		-	B - C*
Vegyszerállóság 23°C -on: -aromás szénhidrogének		-	A*
Olvadáspont	°C	ISO 11357-3	260
Üvegesedési hőmérséklet	°C	DIN 53765	48
Fajhő	J/(g.K)	ISO 22007-4:2008	1.2
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 60°C között	m/(m.K)x10 ⁻⁵	DIN EN ISO 11359-1;2	5
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 100°C között	m/(m.K)x10 ⁻⁵	DIN EN ISO 11359-1;2	5
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – rövid idejű	°C		170
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – tartós használatkor	°C		110
Alkalmazhatóság minimális hőmérséklete	°C		- 20
Hőalaktartósság (HDT)	°C	DIN EN ISO 75, A	150
Folyáshatár	MPa	DIN EN ISO 527-2	91
Húzó rugalmassági modulus	MPa	DIN EN ISO 527-2	5500
Szakadási nyúlás	%	DIN EN ISO 527-2	13
Hajlító szilárdság	MPa	DIN EN ISO 178	135
Charpy ütőszilárdság	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1eU	87
Húzó szilárdság	MPa	DIN EN ISO 527-2	91
Nyomó szilárdság	MPa	EN ISO 604 1%/2%	25/46
Charpy ütőszilárdság, hornyolt	kJ/m ²	DIN EN ISO 179-1eA	
Golyóbenyomódásos keménység	MPa	ISO 2039-1	216
Shore D keménység	-	DIN EN ISO 868	86

(*) jelmagyarázat:

- A – alkalmazható
- B - korlátozottan alkalmazható
- C - nem alkalmazható

PA 6G-H ELS műszaki adatlapja

Tulajdonság	Vizsgálat	Mértékegység	Érték
-------------	-----------	--------------	-------

8. Mellékletek

Alapszín			fekete
Sűrűség	DIN EN ISO 1183	g/cm ³	1.17
Vízfelvétel: telítettség levegőn, 24 h/96 h, (23°C)	DIN EN ISO 62	%	0.2/0.4
Éghetőségi fokozat UL94 szerint	DIN IEC 60695-11-10	-	HB
Húzó szilárdság	DIN EN ISO 527-2	MPa	
Folyáshatár	DIN EN ISO 527-2	MPa	75
Húzó rugalmassági modulus	DIN EN ISO 527-2	MPa	4000
Szakadási nyúlás	DIN EN ISO 527-2	%	5
Nyomó szilárdság	EN ISO 604 1%/2%	MPa	17/30
Hajlító szilárdság	DIN EN ISO 178	MPa	120
Charpy ütőszilárdság	DIN EN ISO 179-1eU	kJ/m ²	82
Charpy ütőszilárdság, hornyolt	DIN EN ISO 179-1eA	kJ/m ²	3
Golyóbenyomódásos keménység	ISO 2039-1	MPa	170
Shore D keménység	DIN EN ISO 868	-	80
Olvadáspont	ISO 11357-3	°C	218
Üvegesedési hőmérséklet	DIN 53765	°C	40
Hővezetési tényező	ISO 22007-4:2008	W/(K.m)	0.30
Fajhő	ISO 22007-4:2008	J/(g.K)	1.7
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 60°C között	DIN EN ISO 11359-1;2	m/(m.K)x10 ⁻⁵	12
Lineáris hőtágulási együttható (CLTE): 23 - 100°C között	DIN EN ISO 11359-1;2	m/(m.K)x10 ⁻⁵	12
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – rövid idejű		°C	170
Alkalmazható max. hőmérséklet levegőn – tartós használatkor		°C	105
Alkalmazhatóság minimális hőmérséklete		°C	- 40
Hőalaktartósság (HDT)	DIN EN ISO 75, A	°C	100
Vegyszerállóság 23°C -on: - gyenge sav	-		B
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős sav	-		C
Vegyszerállóság 23°C -on: - gyenge lúg	-		A
Vegyszerállóság 23°C -on: - erős lúg	-		B - C
Vegyszerállóság 23°C -on: - aromás szénhidrogének	-		A
Vegyszerállóság 23°C -on: - alfás szénhidrogének	-		A
Vegyszerállóság 23°C -on: - klórozott oldószerek	-		B

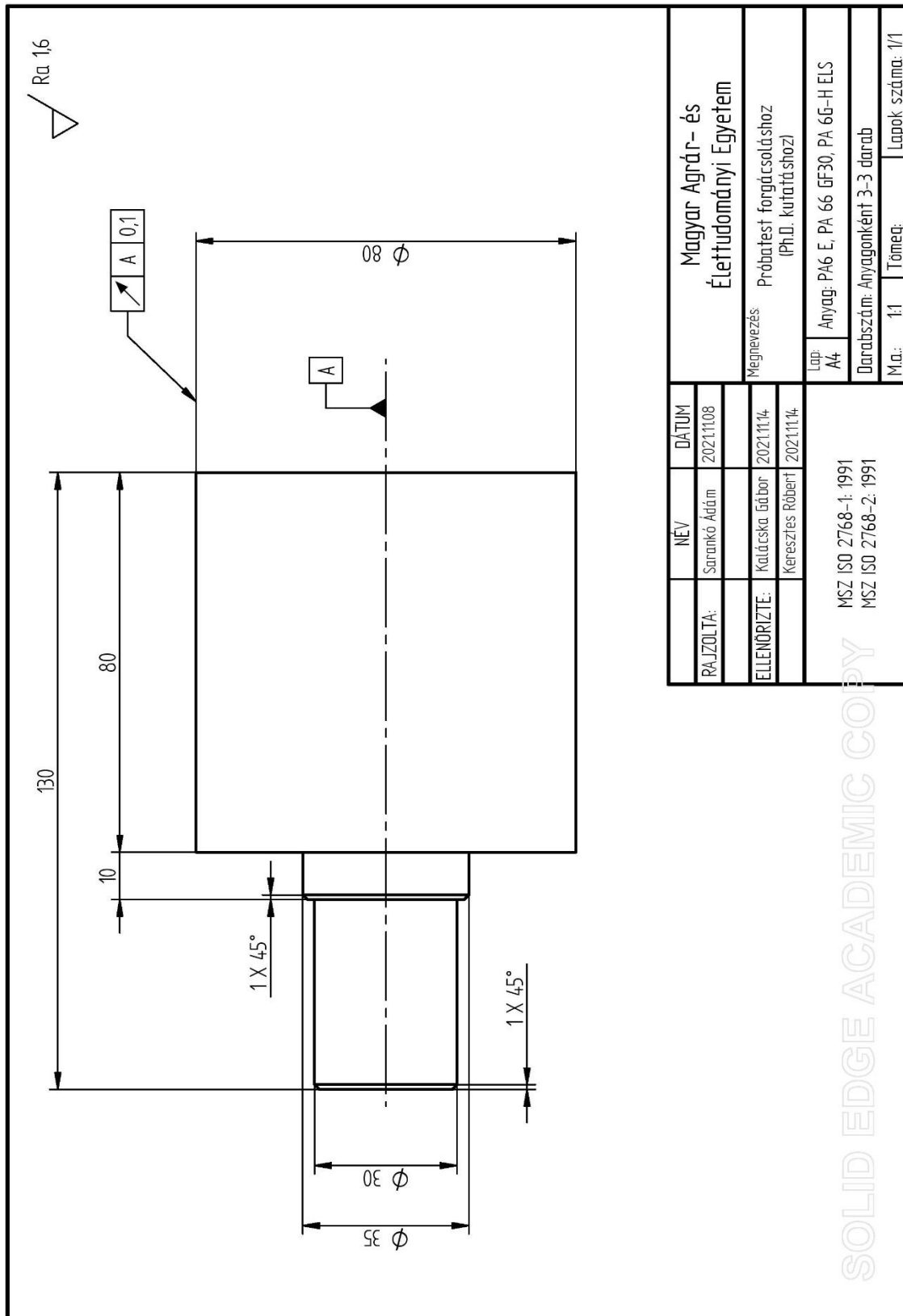
8. Mellékletek

Vegyszerállóság 23°C -on: - alkoholok			A
Dielektromos állandó,	IEC 60250	-	
Dielektromos veszteségi tényező (50 Hz)	IEC60 250	-	
Térfogati ellenállás	IEC60093	$\Omega \cdot \text{cm}$	10^6
Felületi ellenállás	IEC60093	Ω	10^6
Kúszóáram szilárdság, CTI	IEC 60112	-	
Átütési szilárdság	IEC 60243	kV/mm	

(*) jelmagyarázat:

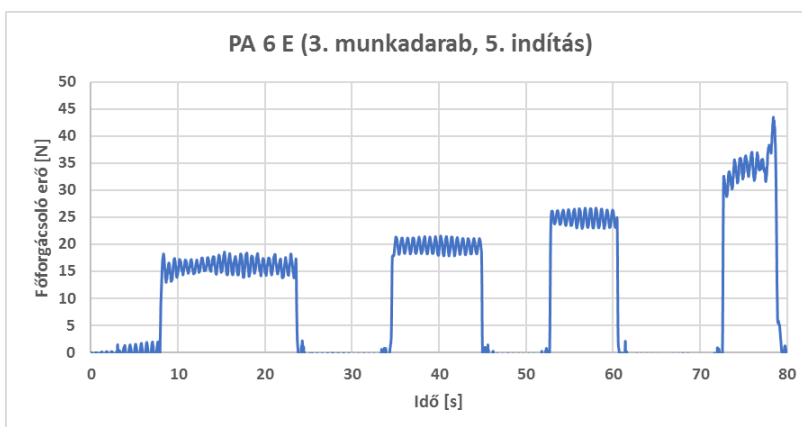
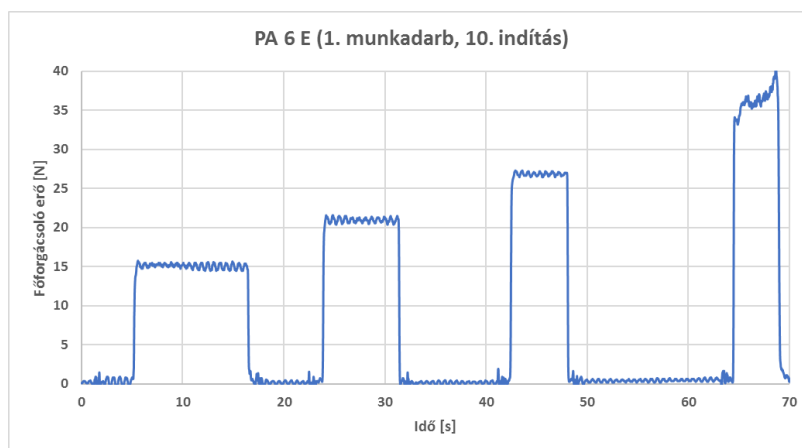
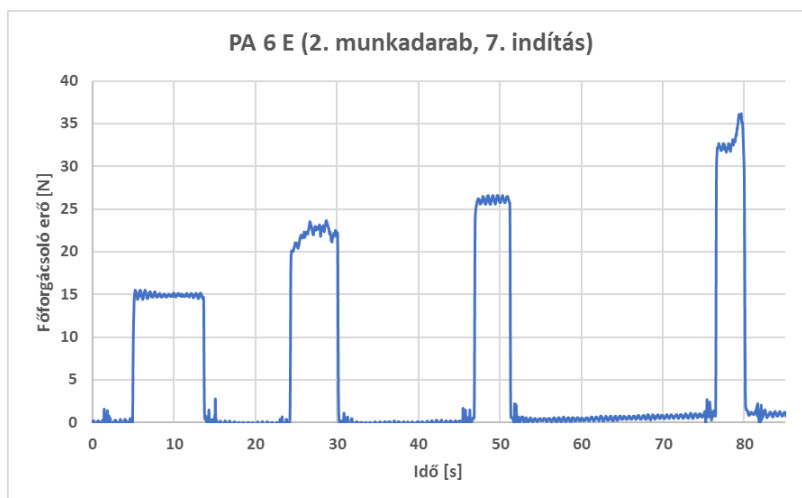
- A – alkalmazható
- B - korlátozottan alkalmazható
- C - nem alkalmazható

M4: Esztergálási vizsgálatok próbatestjeinek műszaki rajza

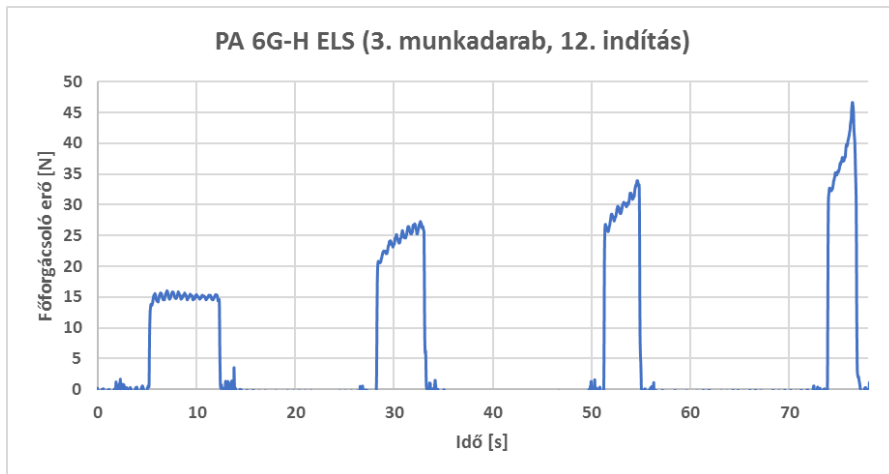
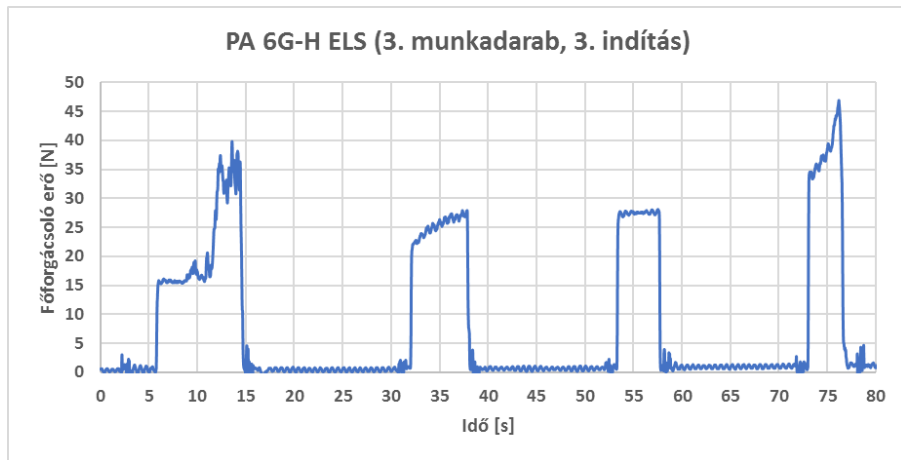
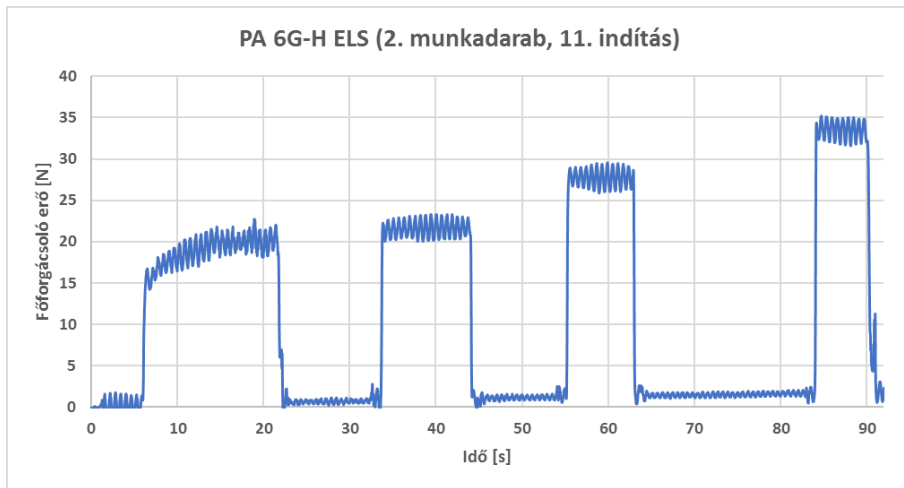


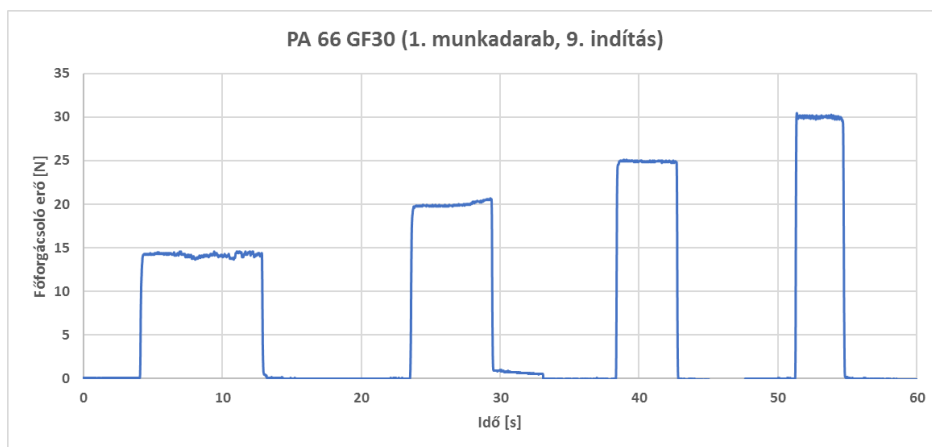
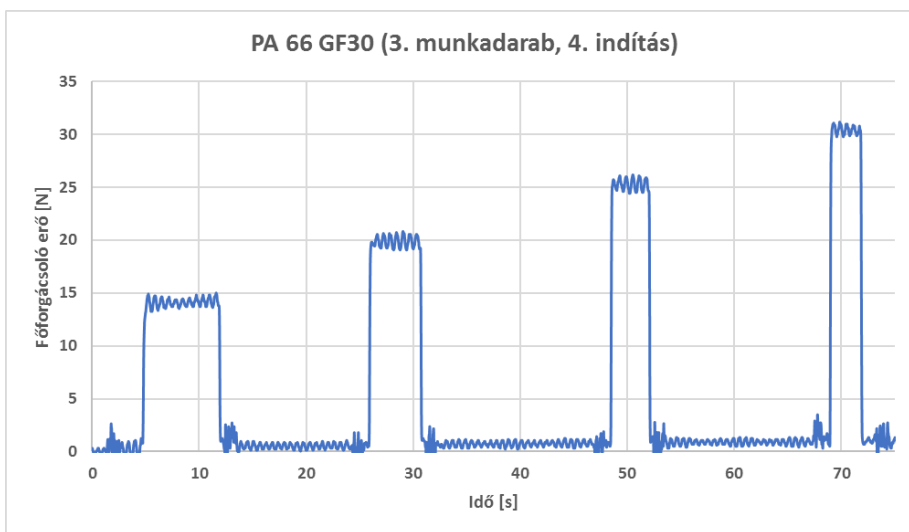
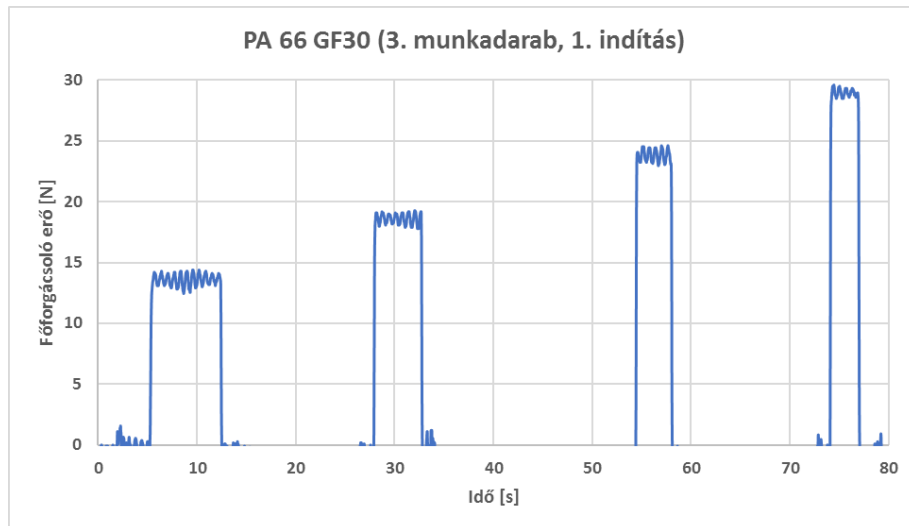
M5: Főforgácsoló erő diagramjai

Az alábbi diagramok címe tartalmazza a munkadarab nevét, sorszámát, illetve a CNC program számát. Az összes diagram ábrázolását a melléklet terjedelme nem engedi meg (108 diagram összevonva CNC programonként), így minden anyag esetén 3-3 diagramot ábrázolok.



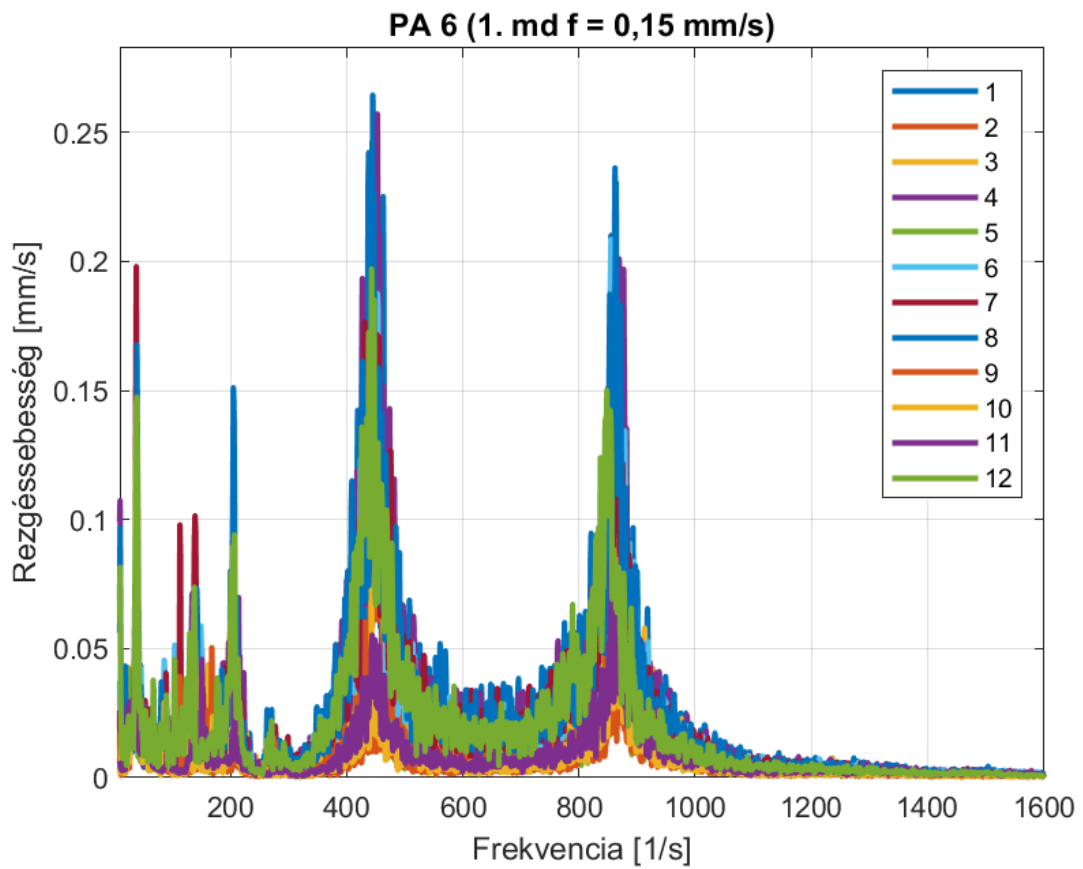
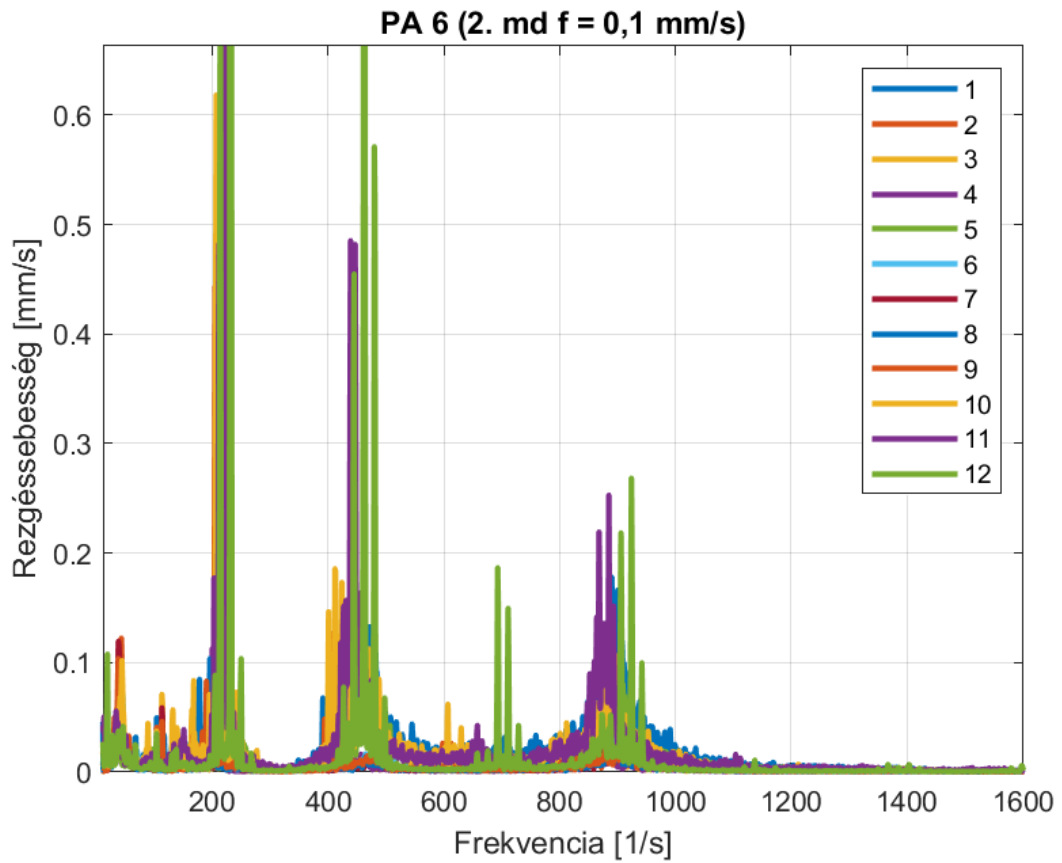
8. Mellékletek

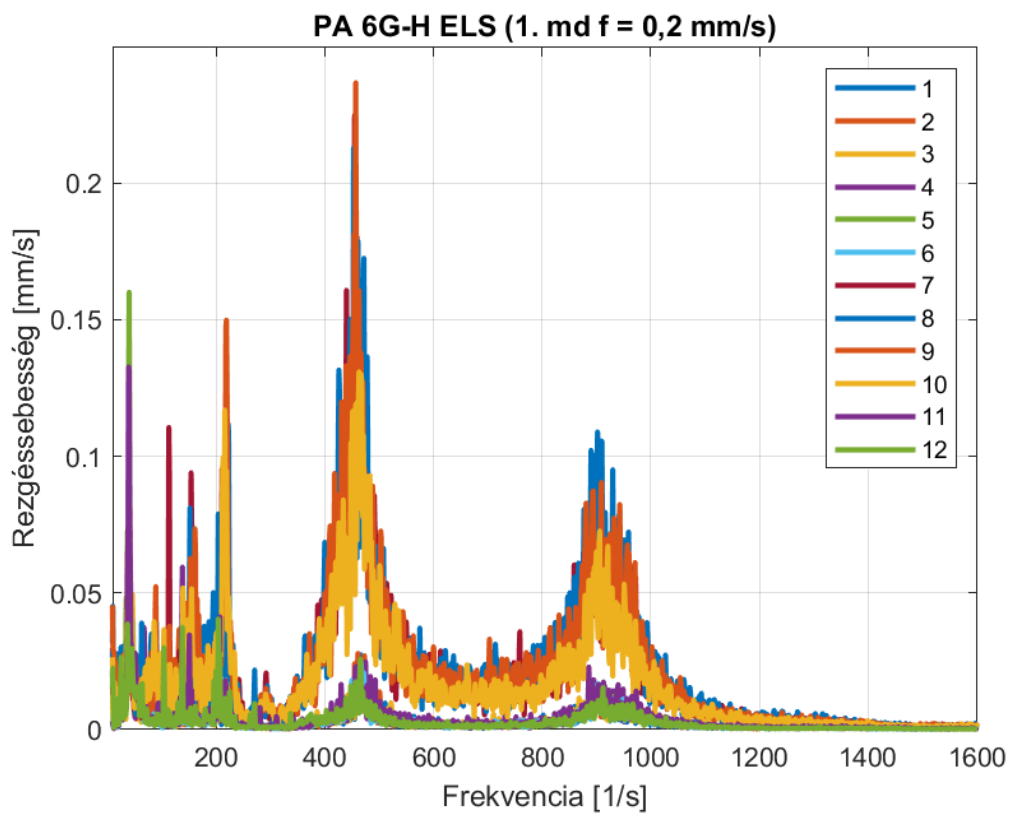
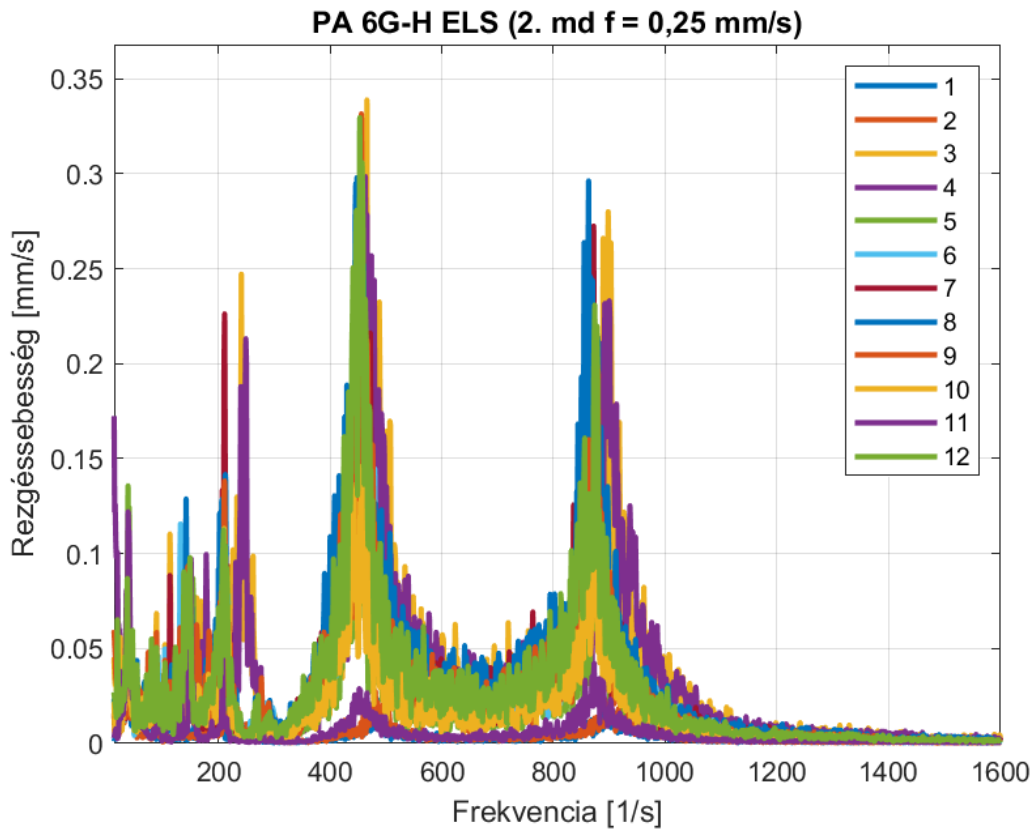


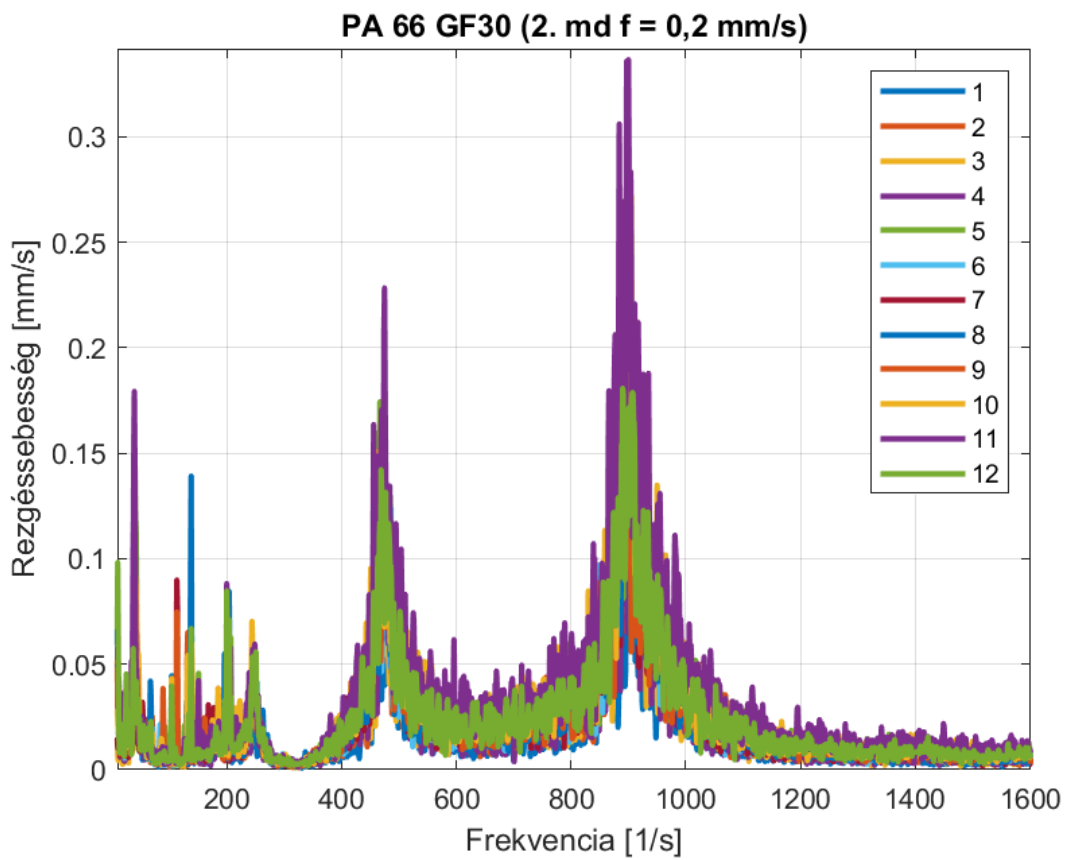
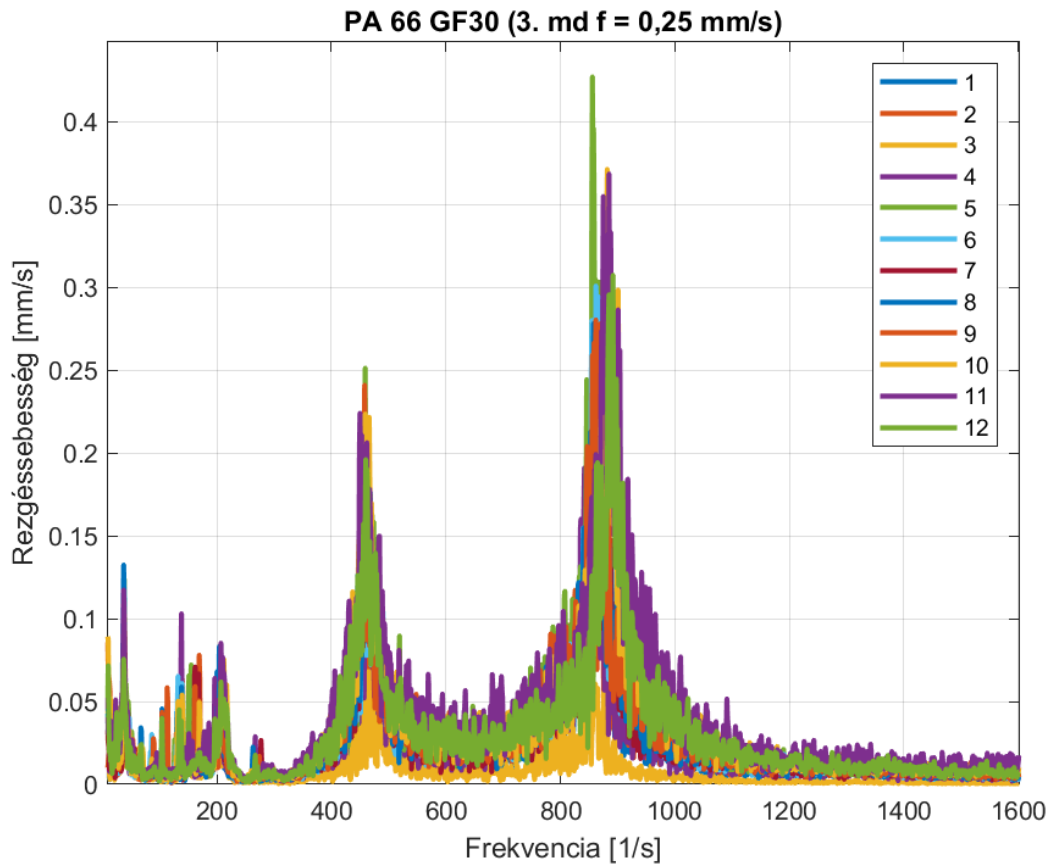


M6: Rezgés mérés eredményei diagram formájában

Az alábbi diagramok címe tartalmazza a munkadarab anyagát, sorszámát, illetve az előtolás nagyságát. A diagramokon jobb oldalt látható a CNC programok száma különféle színekkel jelölve. Az összes diagram ábrázolását a melléklet terjedelme nem engedi meg (432 diagram), így anyagonként kétféle előtolás esetén mutatom az összes indítás során mért eredményeket.







M7: Felületi érdesség mérési jegyzőkönyvek

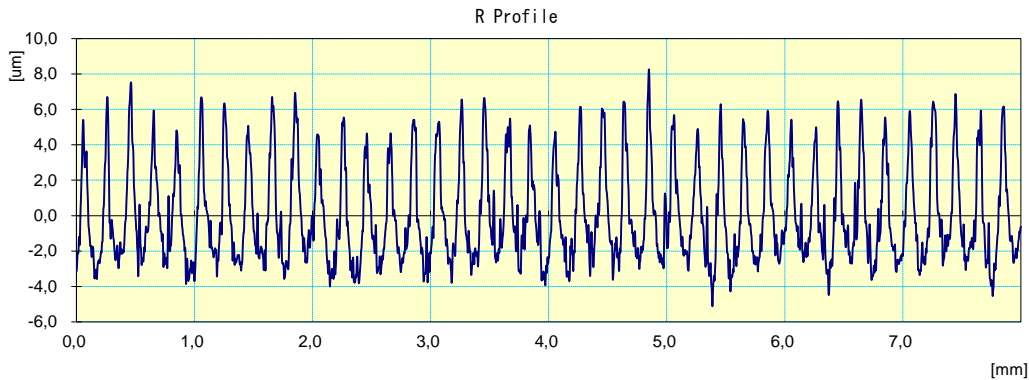
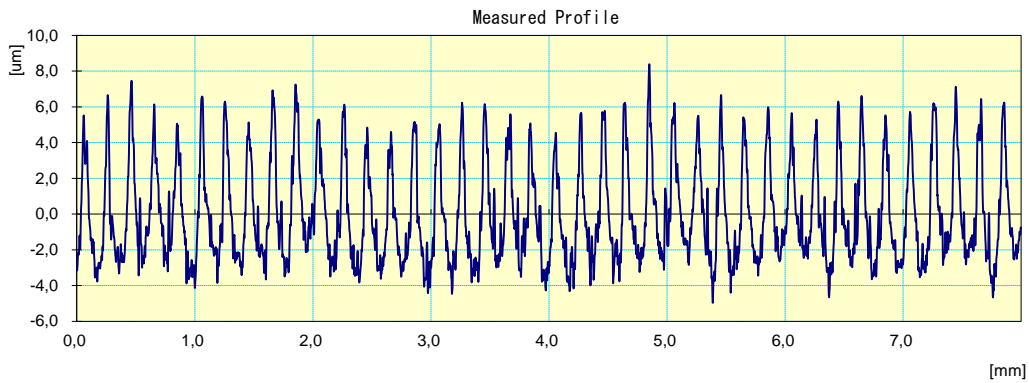
Az alábbiakban néhány felületi érdesség mérési jegyzőkönyvét mutatom be. Az összes jegyzőkönyv bemutatását a melléklet terjedelme nem engedi meg (432 jegyzőkönyv), így anyagonként 3 jegyzőkönyvet mutatok be.

PA 6 E (1. munkadarab, 7. indítás, 3. szakasz):



17- Jun -2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	2.28 um	
Ry	13.39 um	
Rz	13.39 um	
Rq	2.77 um	

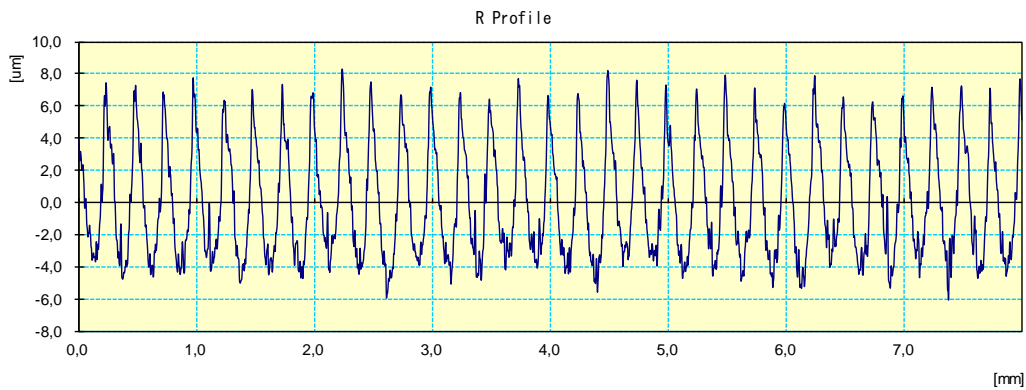
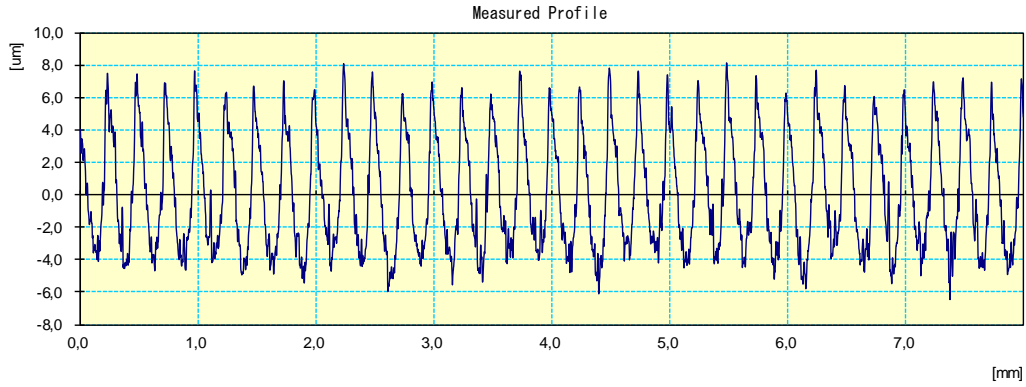
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 6 E (2. munkadarab, 3. indítás, 4. szakasz):



18-Jun-2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	3.04 um	
Ry	14.37 um	
Rz	14.37 um	
Rq	3.50 um	

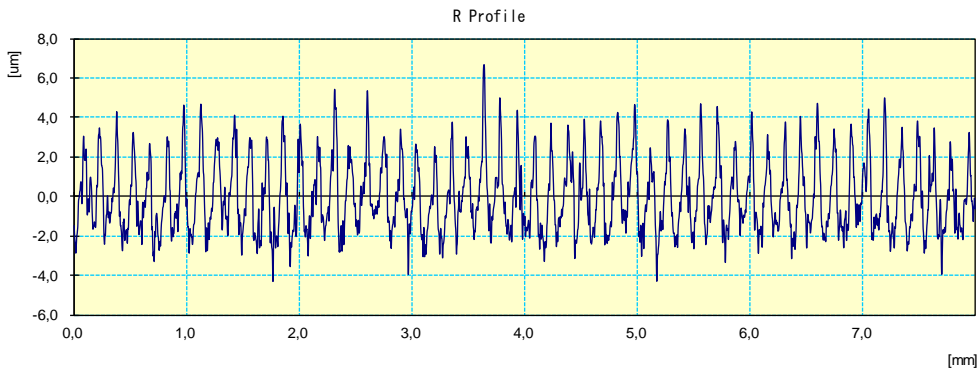
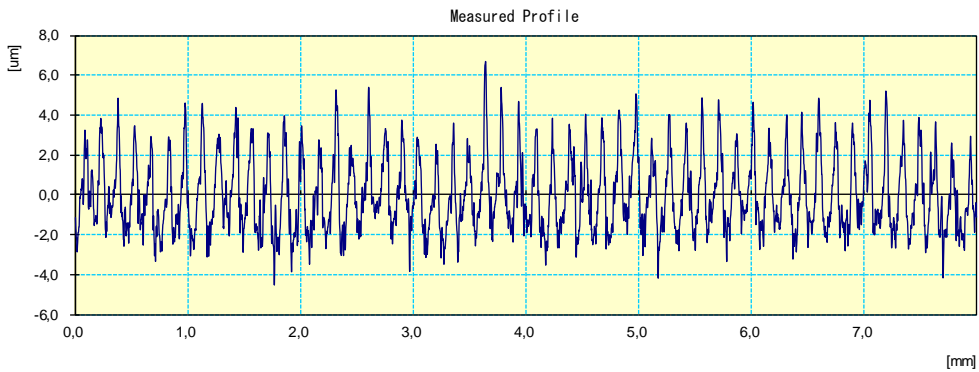
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 6 E (3. munkadarab, 11. indítás, 2. szakasz):



20-Jul-2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.53 um		
Ry	10.96 um		
Rz	10.96 um		
Rq	1.84 um		

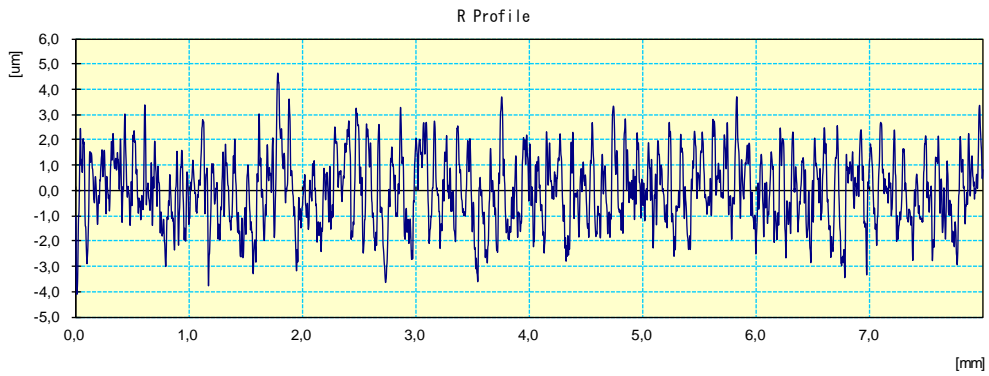
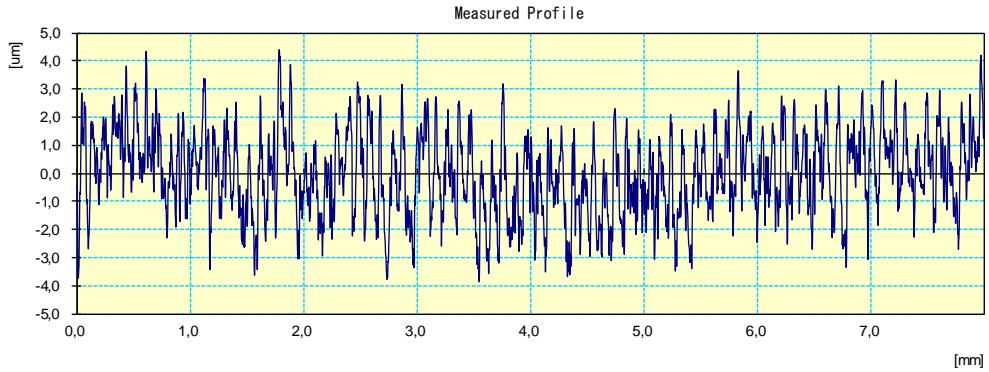
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 6G-H ELS (2. munkadarab, 5. indítás, 1. szakasz):



17-Jun-2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.14 um	
Ry	8.72 um	
Rz	8.72 um	
Rq	1.40 um	

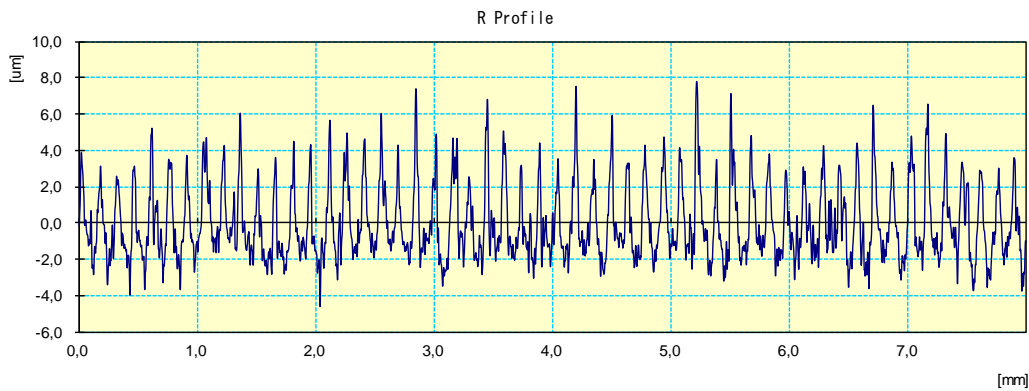
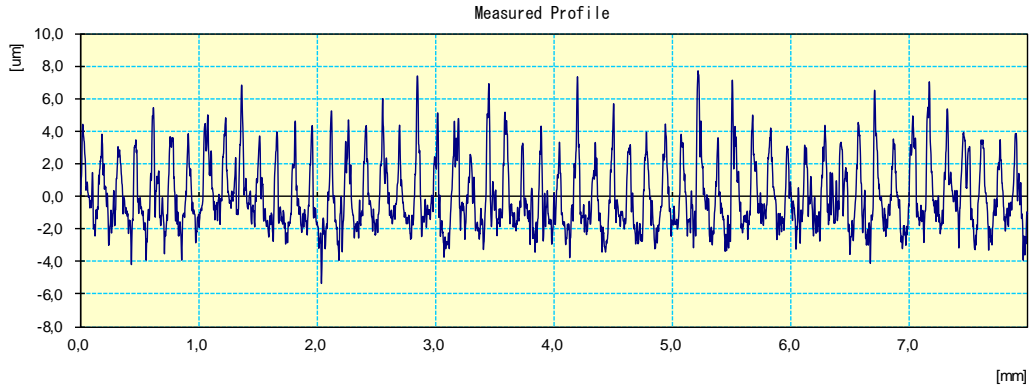
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 6G-H ELS (1. munkadarab, 11. indítás, 3. szakasz):



2- Mar-2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.68 um	
Ry	12.41 um	
Rz	12.41 um	
Rq	2.08 um	

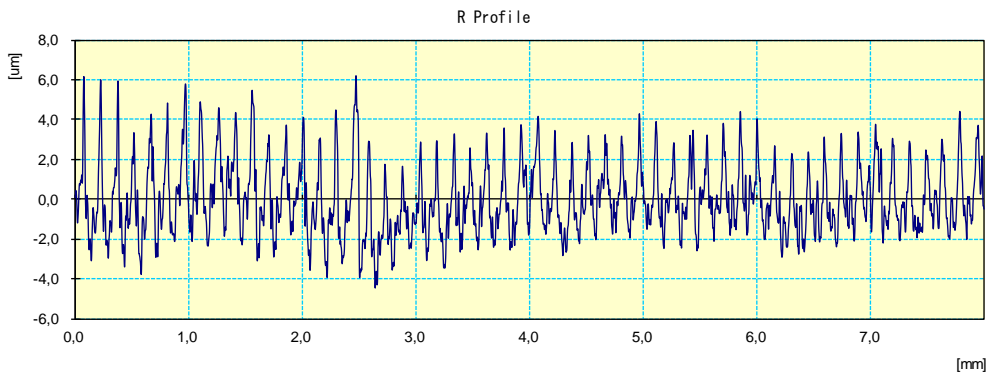
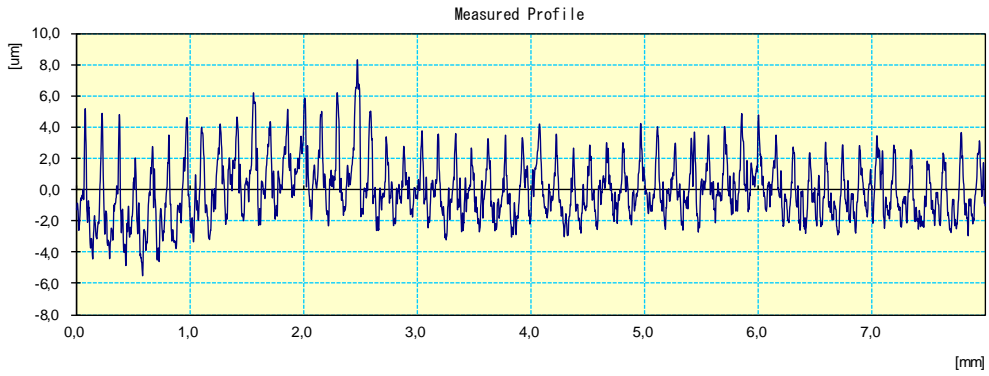
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 6G-H ELS (3. munkadarab, 2. indítás, 2. szakasz):



21-Jul-2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.42 µm	
Ry	10.67 µm	
Rz	10.67 µm	
Rq	1.80 µm	

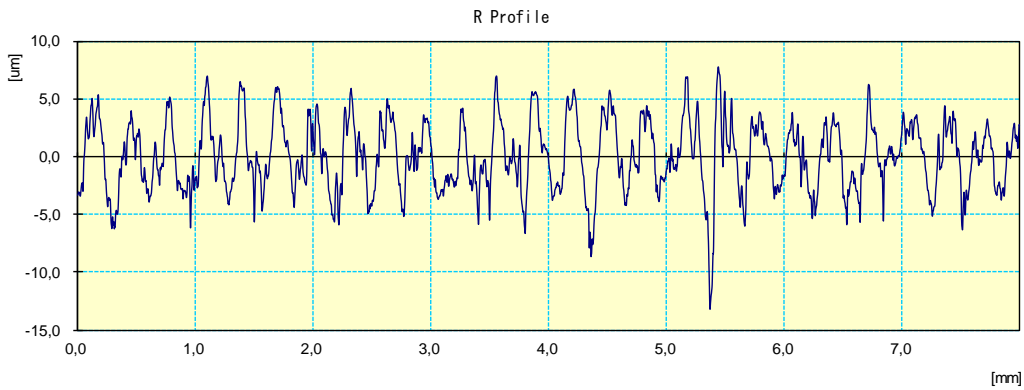
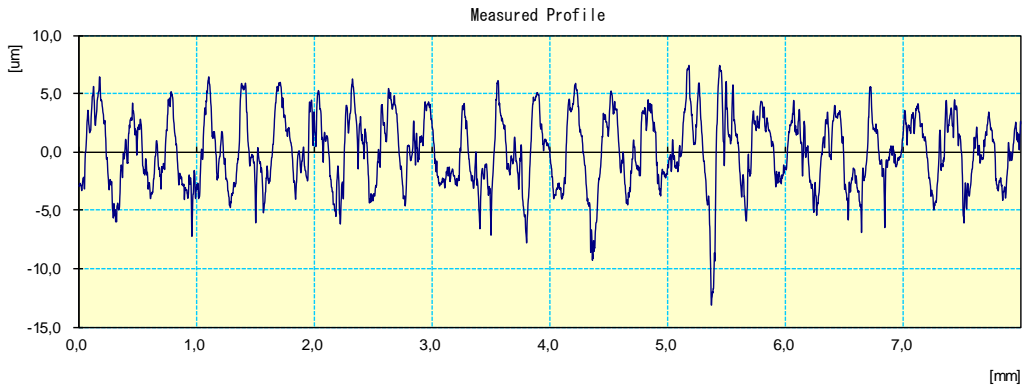
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 66 GF30 (1. munkadarab, 8. indítás, 4. szakasz):



2- Mar -2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	2.46 um	
Ry	20.89 um	
Rz	20.89 um	
Rq	3.02 um	

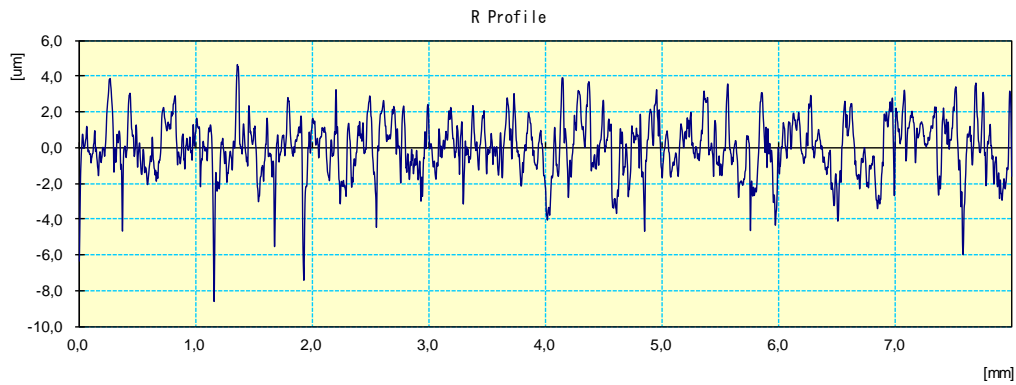
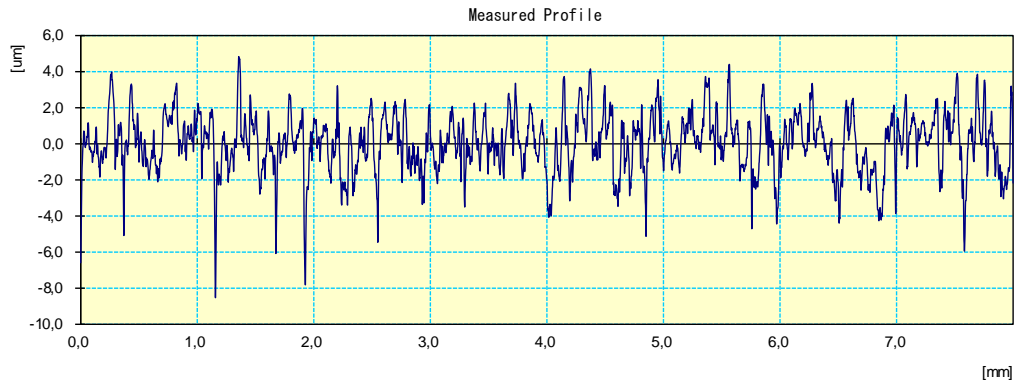
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 66 GF30 (2. munkadarab, 6. indítás, 1. szakasz):



16- Jun -2020

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

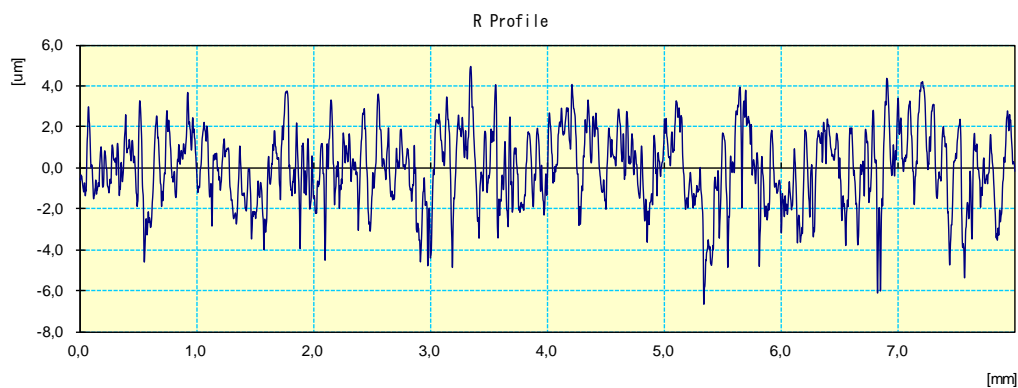
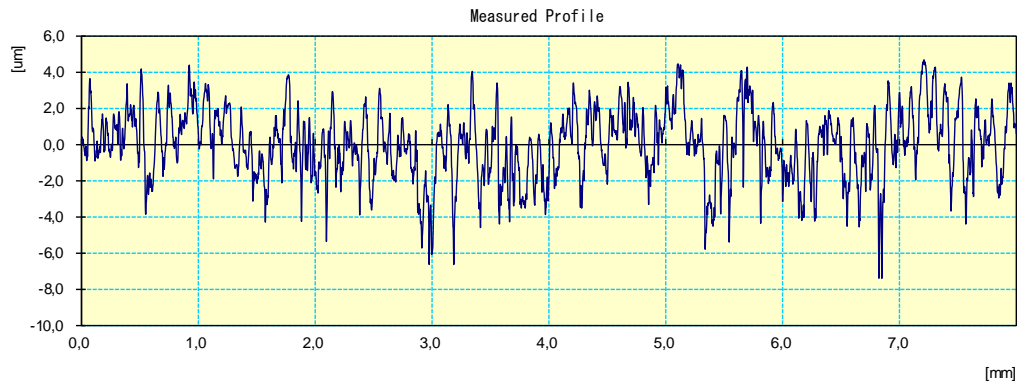
Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.22 um	
Ry	13.30 um	
Rz	13.30 um	
Rq	1.58 um	

Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

PA 66 GF30 (3. munkadarab, 12. indítás, 1. szakasz):

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver4.00

Standard	ISO 1997	Evaluation length	8.0 mm
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	2CR75

Ra	1.47 um	
Ry	11.62 um	
Rz	11.62 um	
Rq	1.82 um	

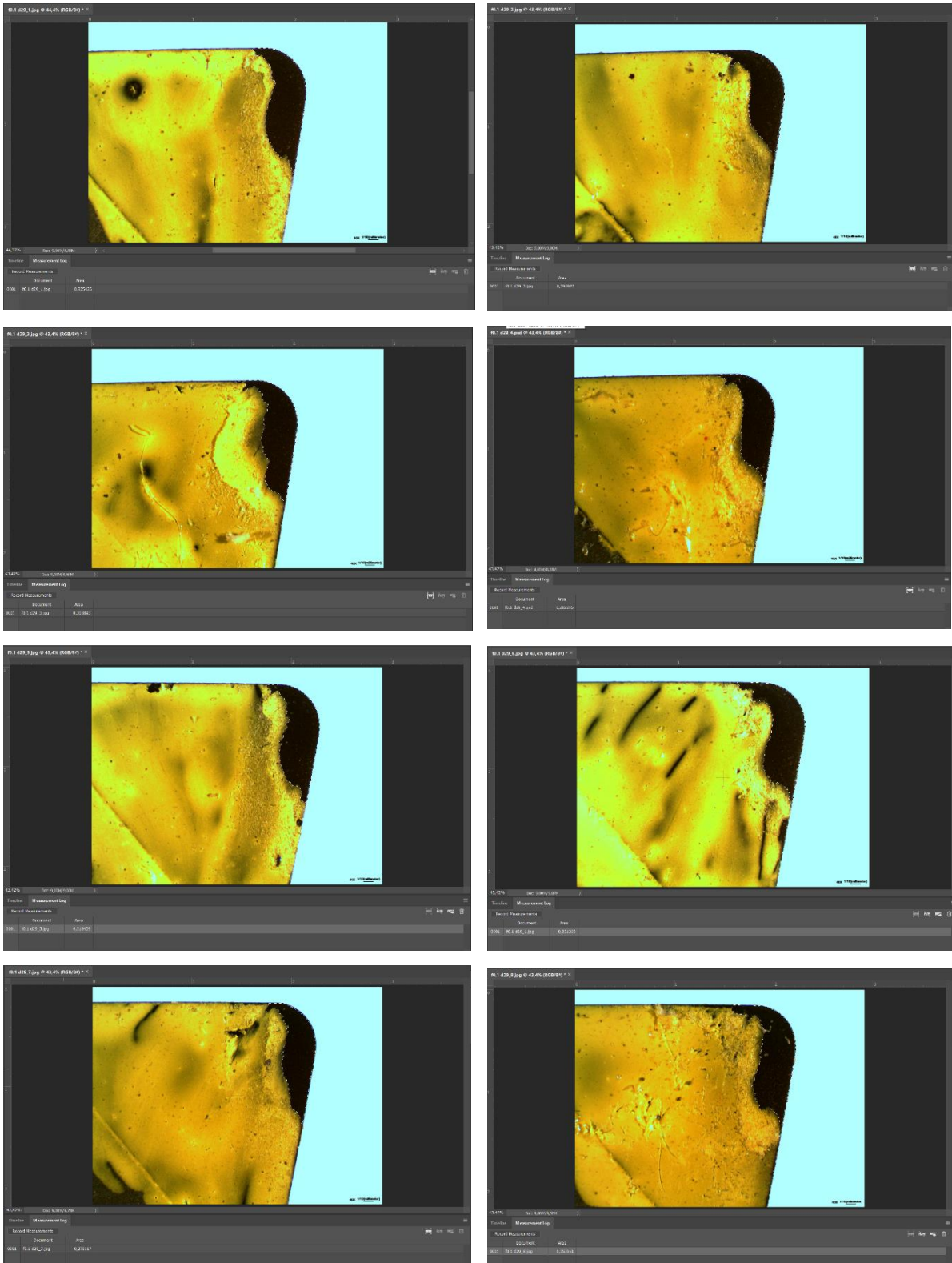
Copyright (C) 2001-2010 Mitutoyo Corporation

M8: Mikroszkóppal készített képek feldolgozása (képernyőképek)

Az alábbiakban a mikroszkóppal készített képek alapján a tribológiai kontakt zónák területeinek mérési folyamatát mutatom PA 6 E esetén.

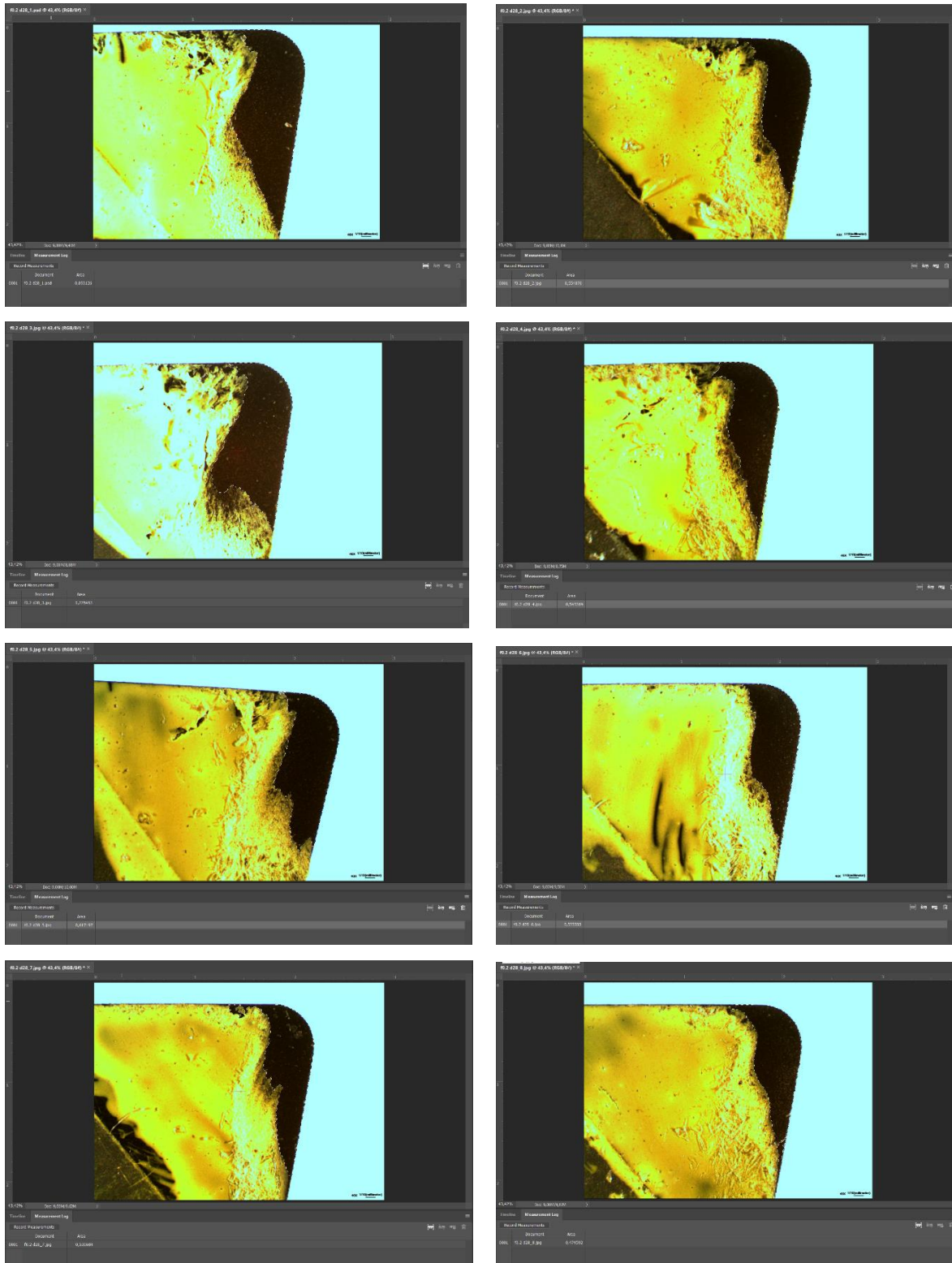
PA 6 E ($f = 0,1$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



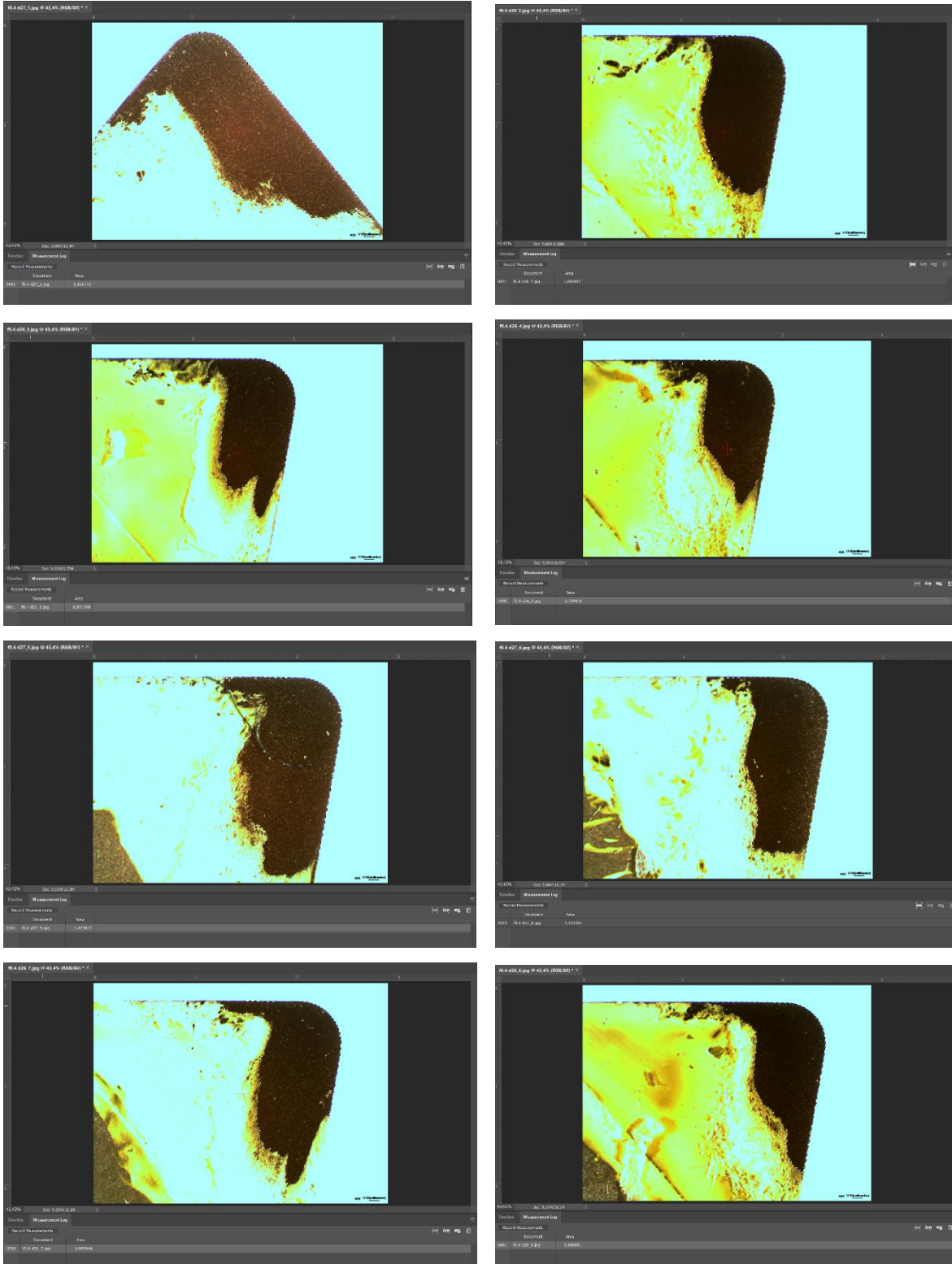
PA 6 E (f = 0,2 mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



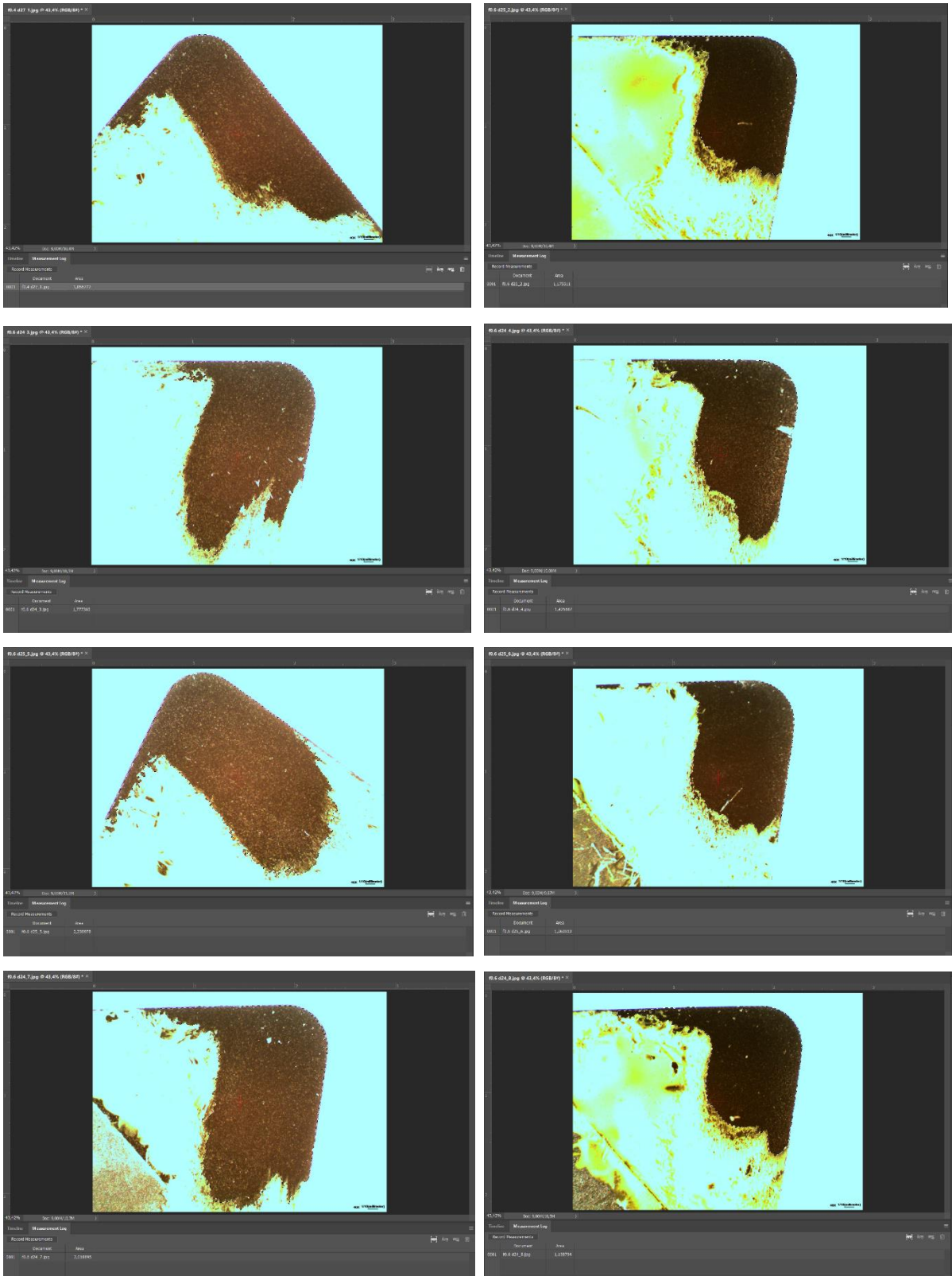
PA 6 E ($f = 0,4$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



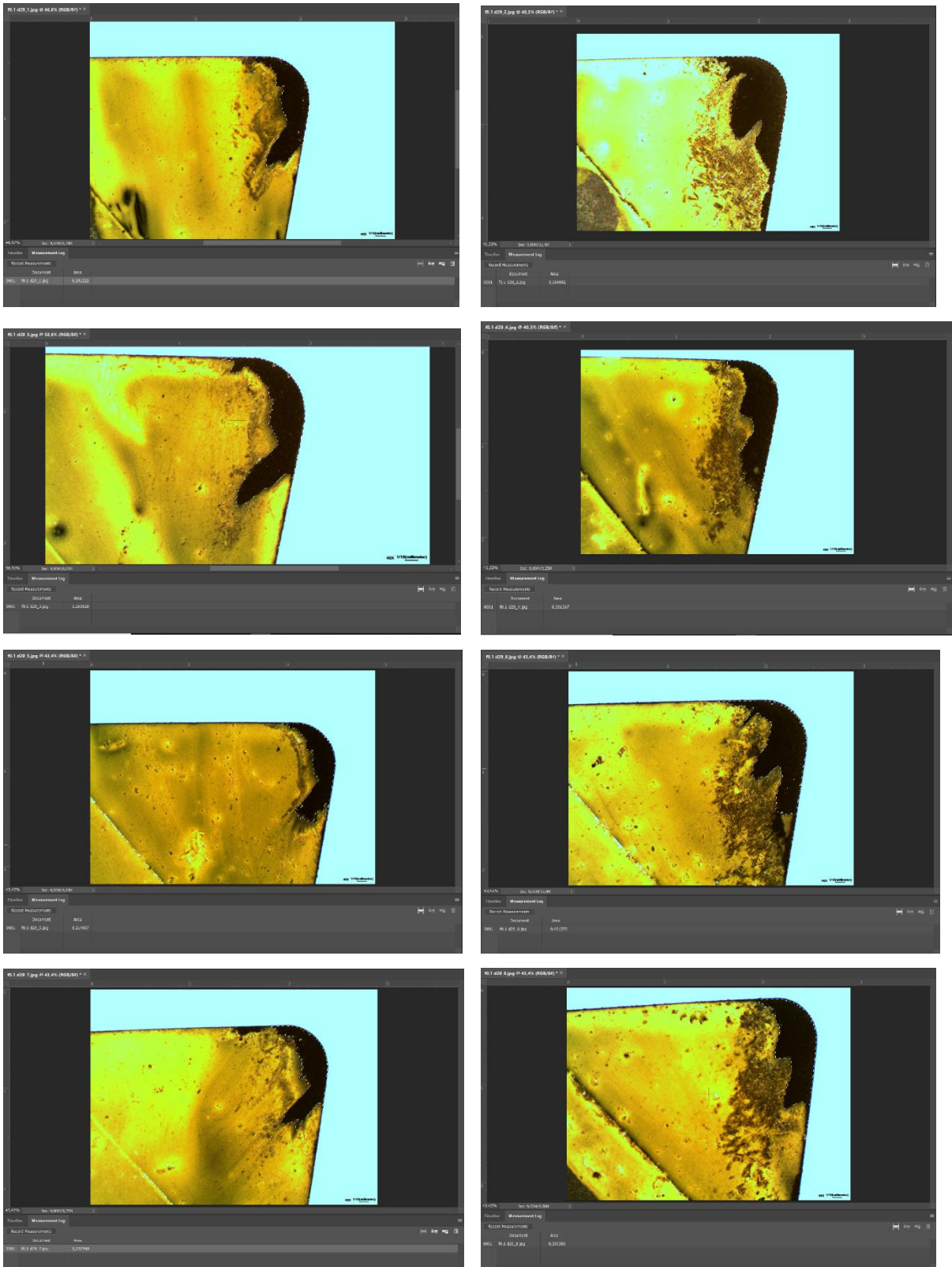
PA 6 E ($f = 0,6$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



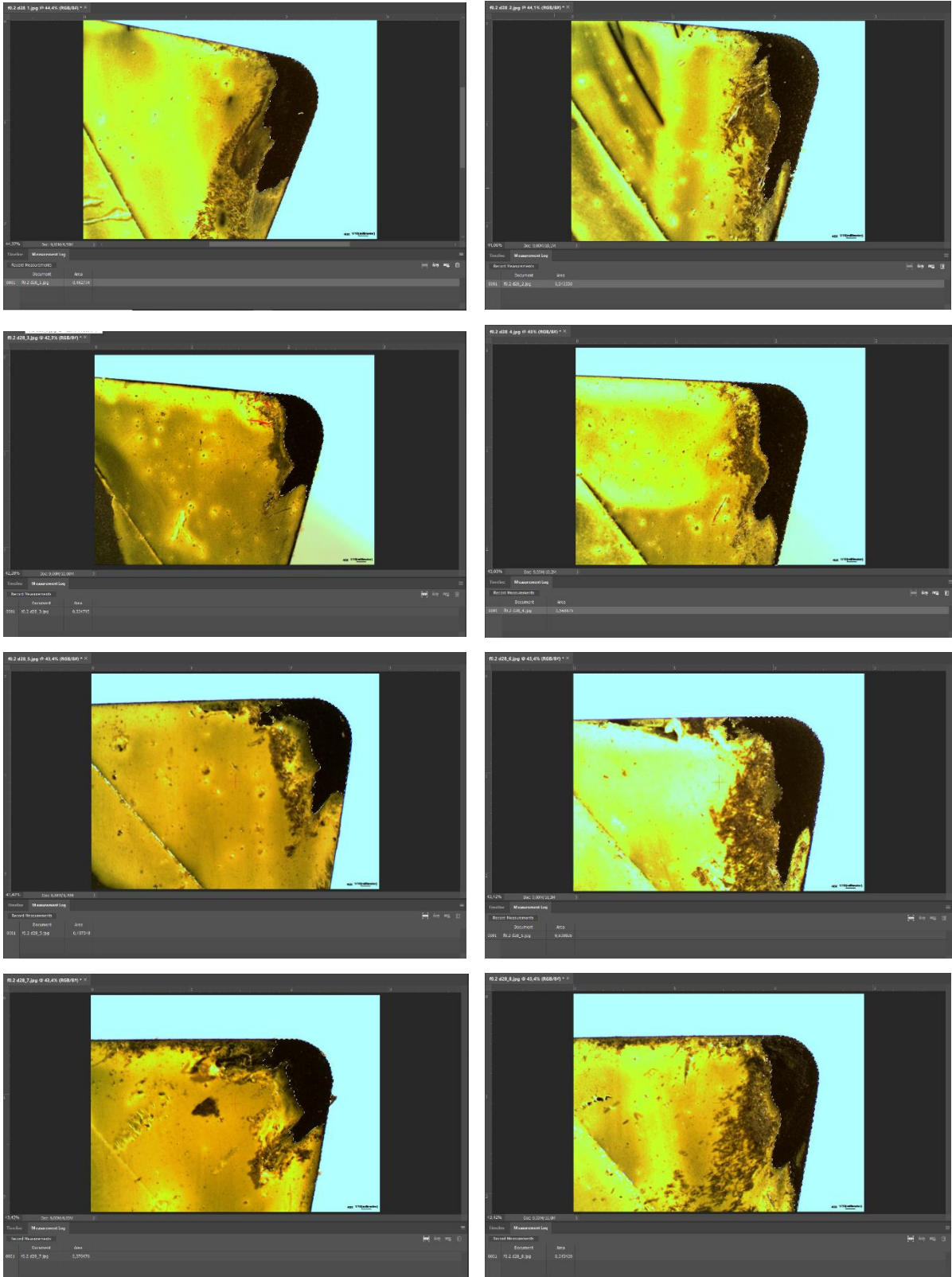
PA 6G-H ELS ($f = 0,1$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



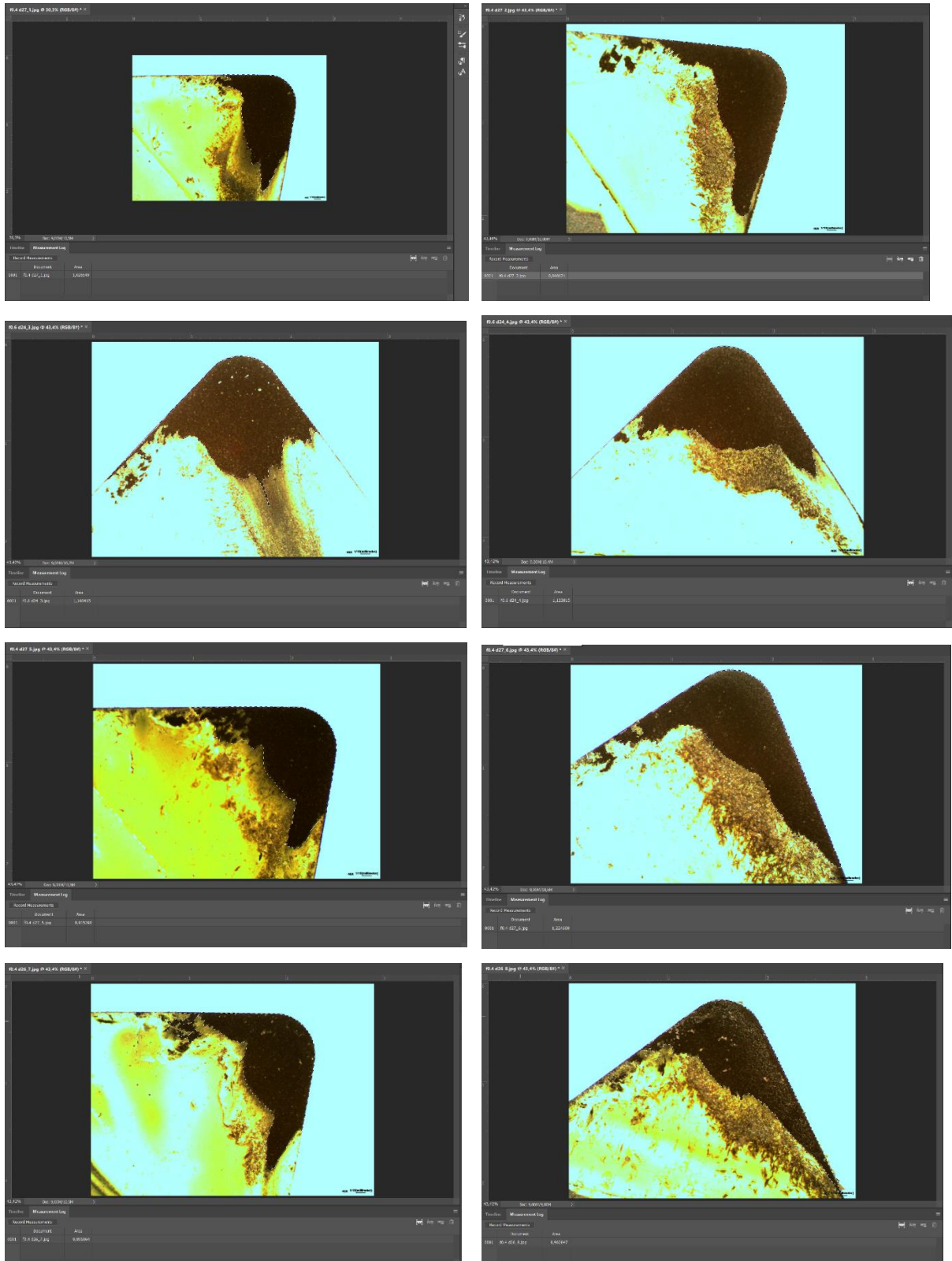
PA 6G-H ELS ($f = 0,2$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



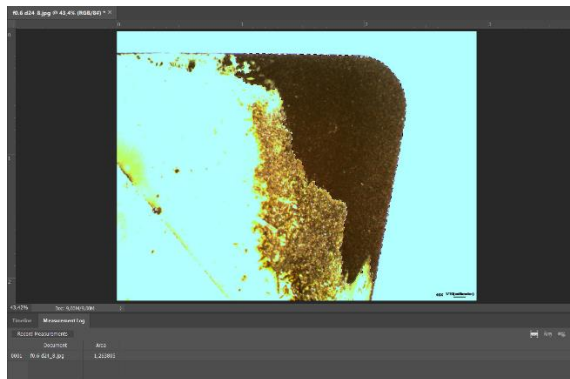
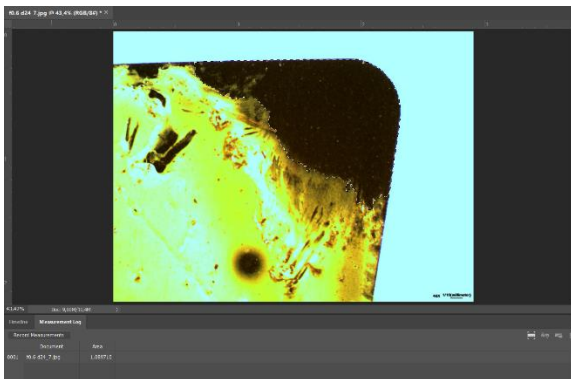
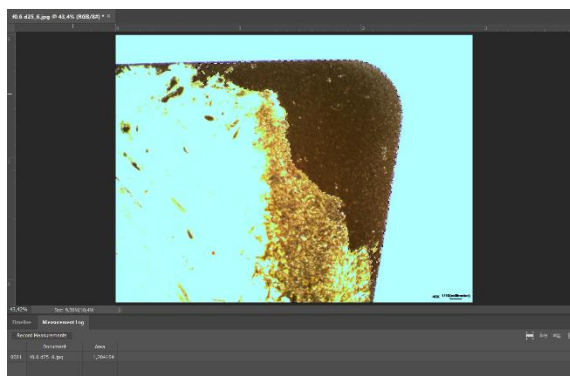
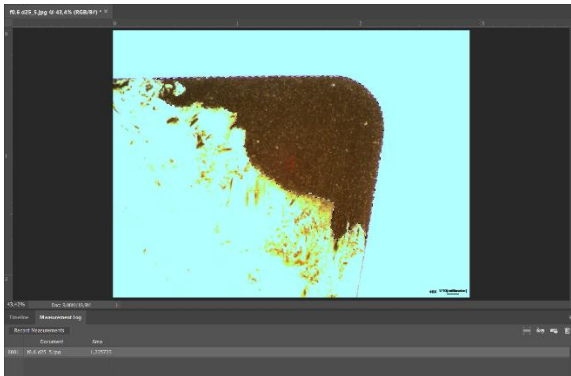
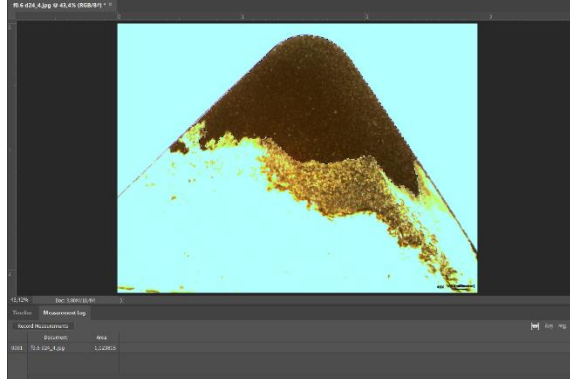
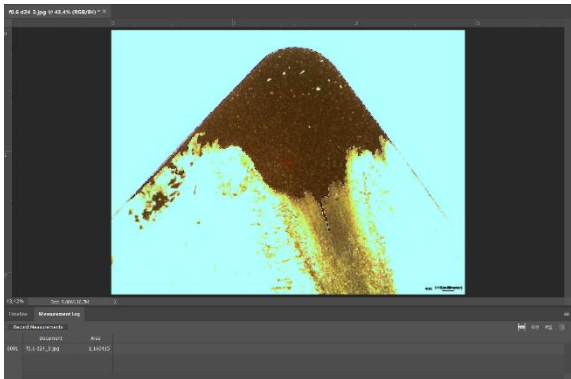
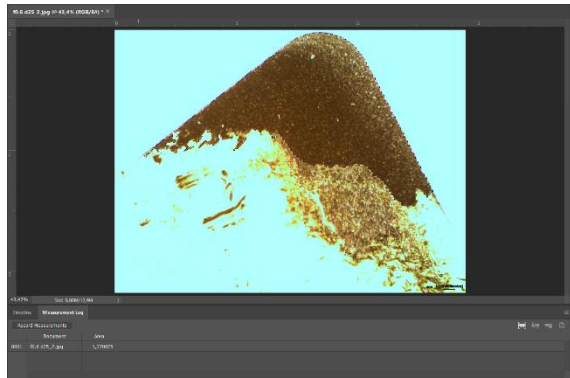
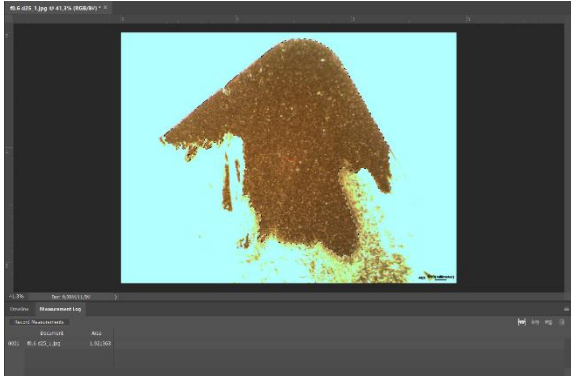
PA 6G-H ELS ($f = 0,4$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



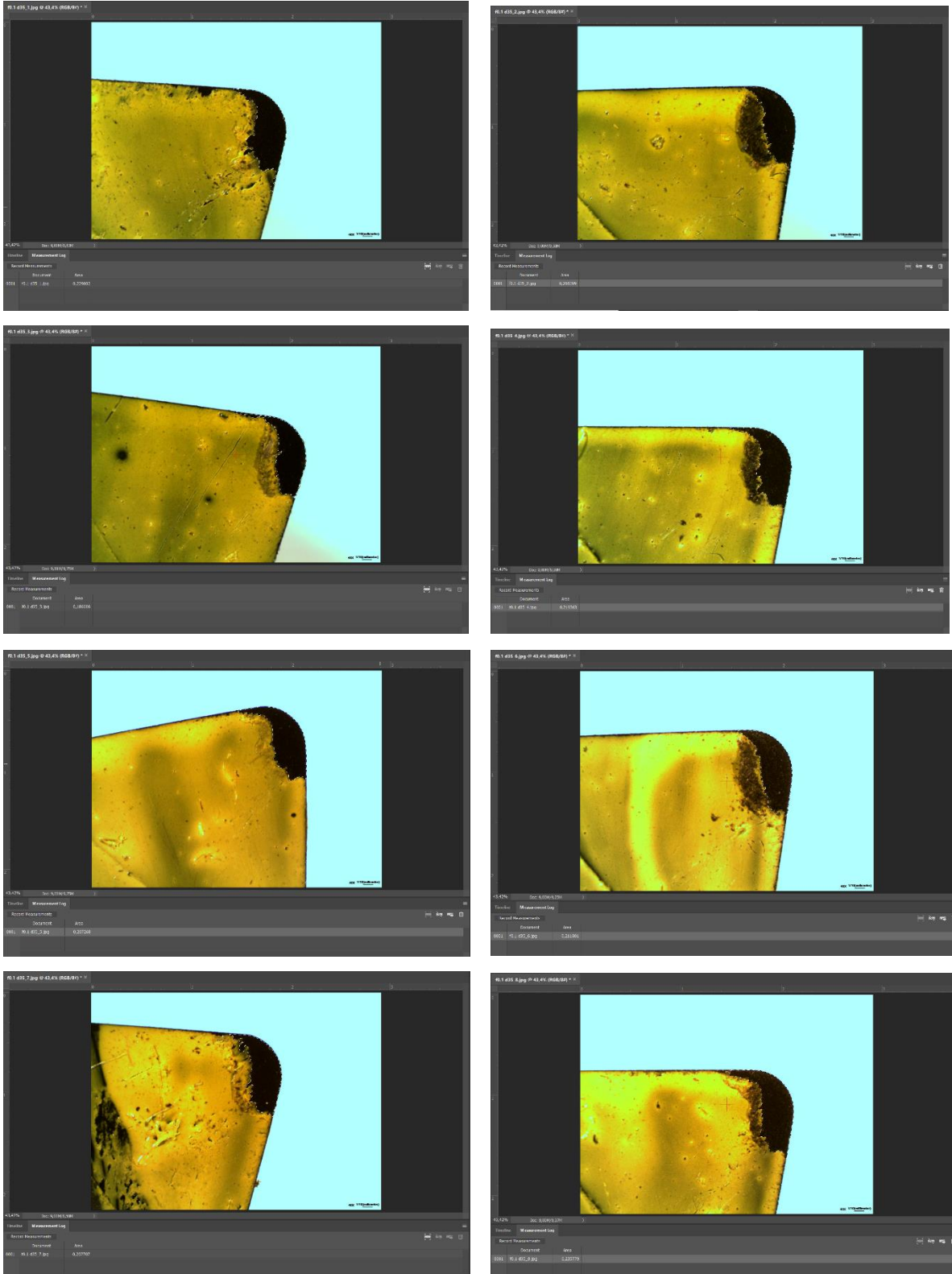
PA 6G-H ELS ($f = 0,6$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



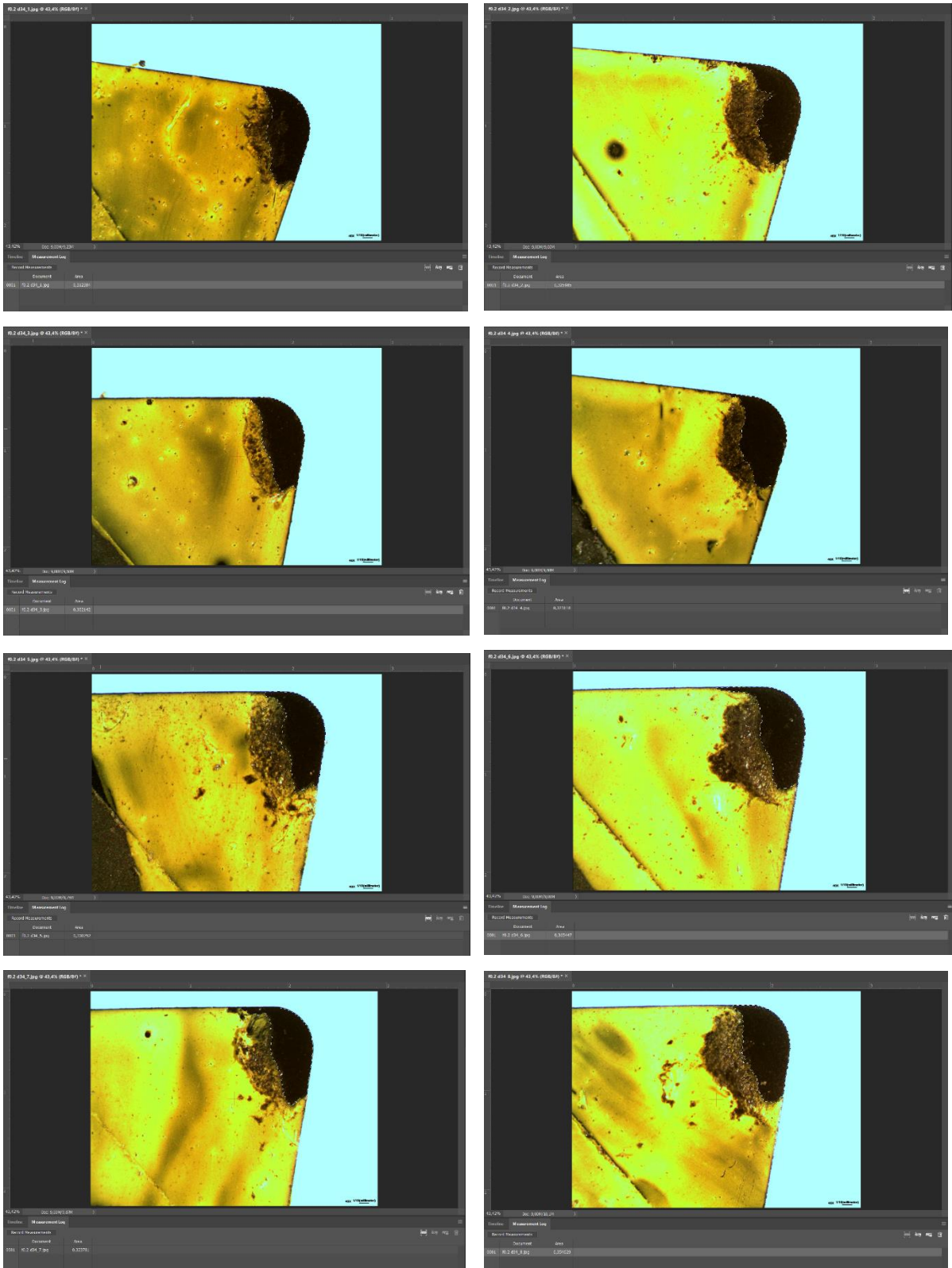
PA 66 GF30 ($f = 0,1$ mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



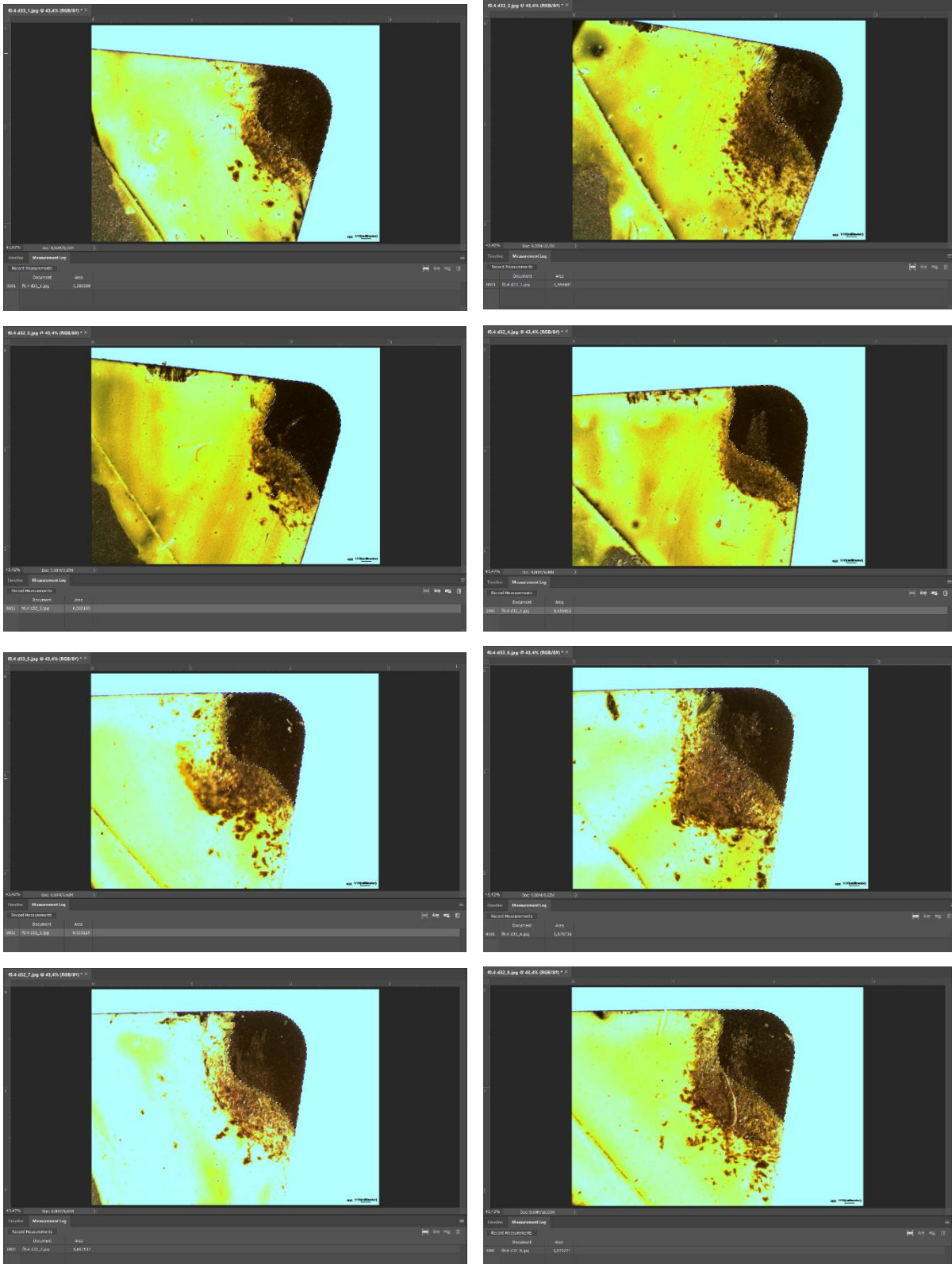
PA 66 GF30 (f = 0,2 mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek



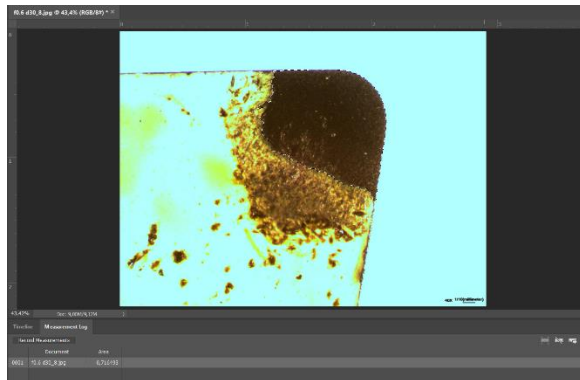
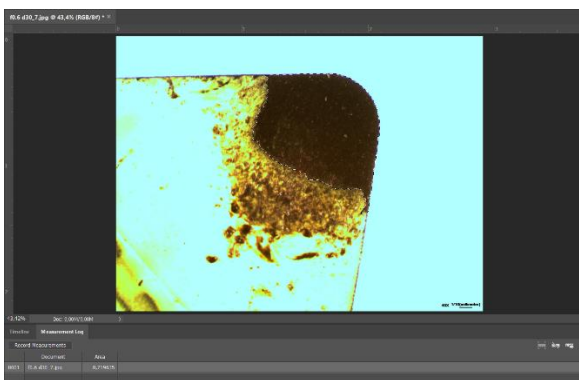
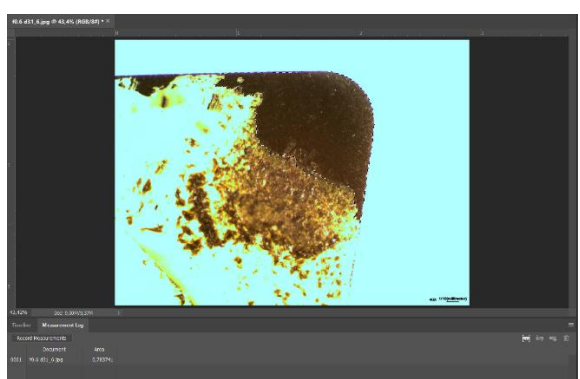
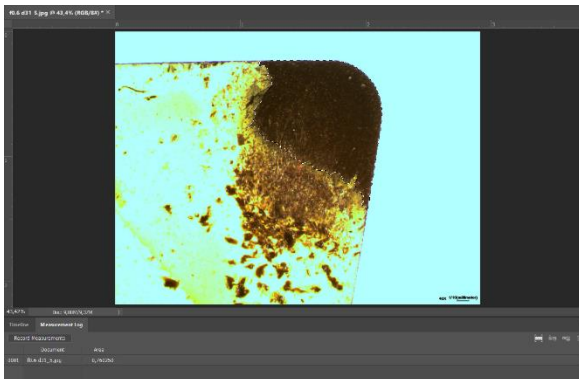
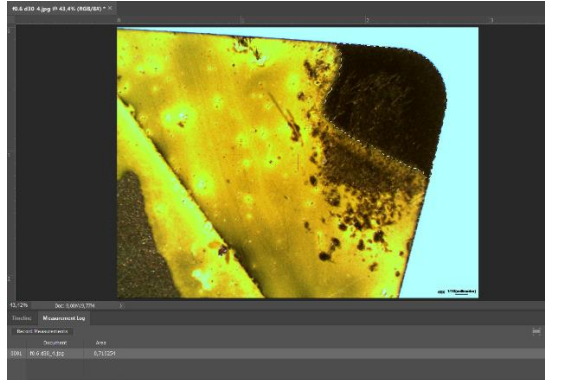
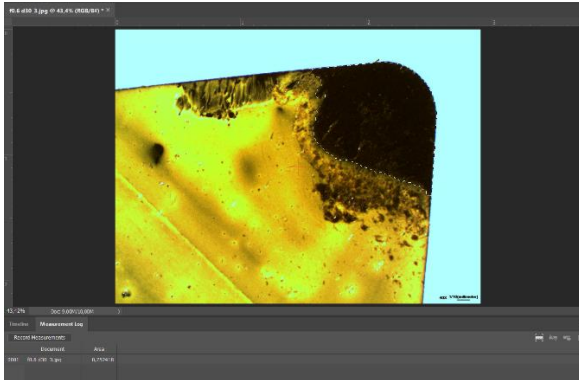
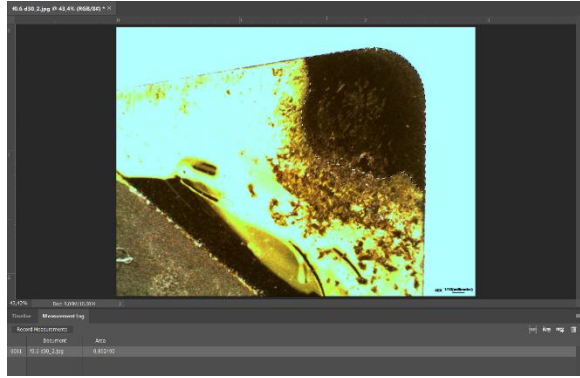
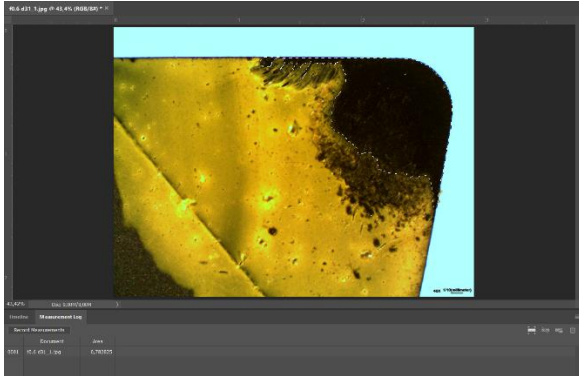
PA 66 GF30 (f = 0,4 mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

8. Mellékletek

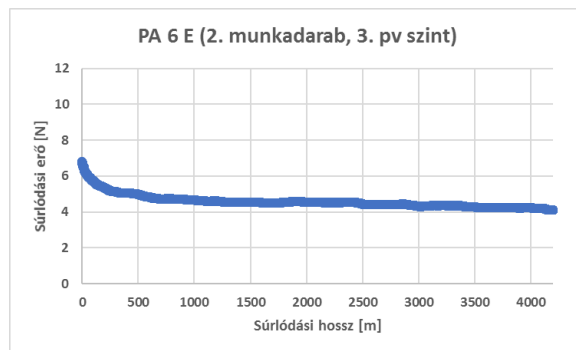
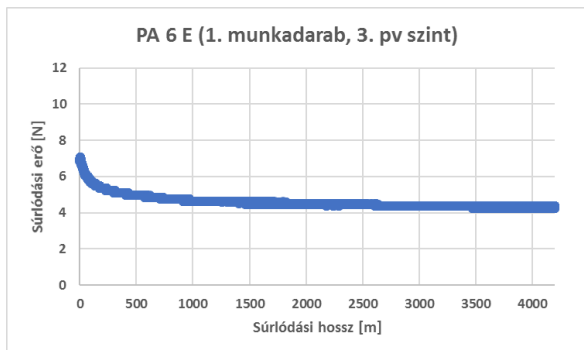
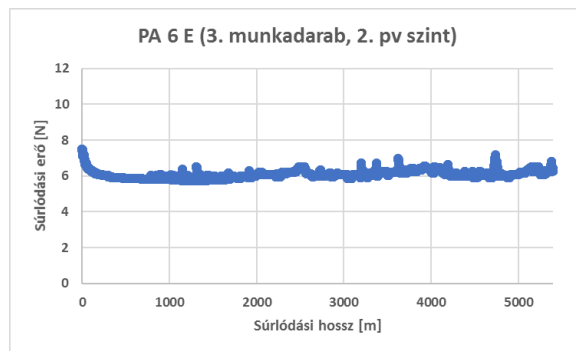
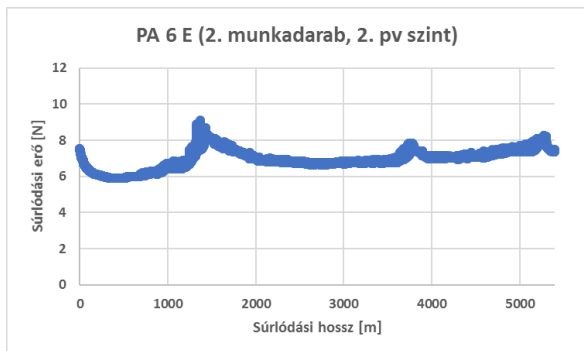
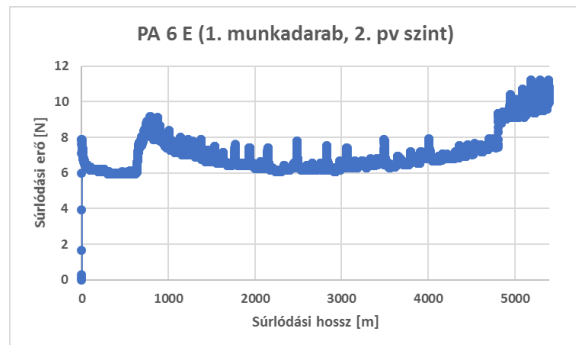
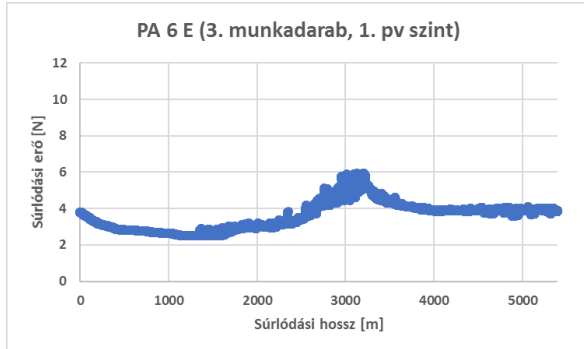
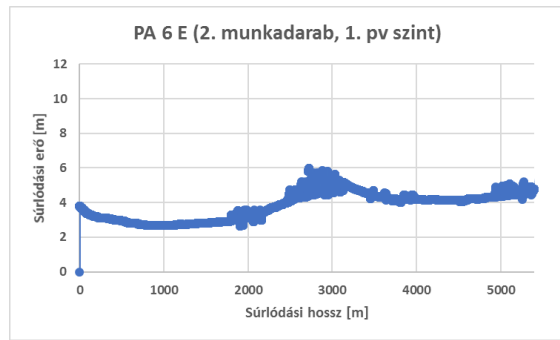
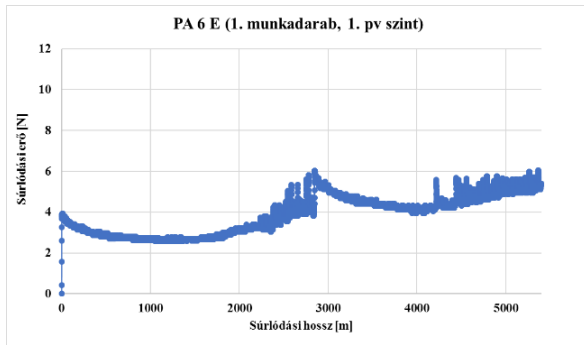


PA 66 GF30 (f = 0,6 mm/fordulat, rendre a 8 ismétlés):

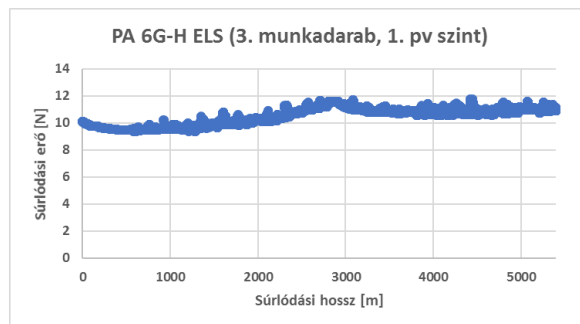
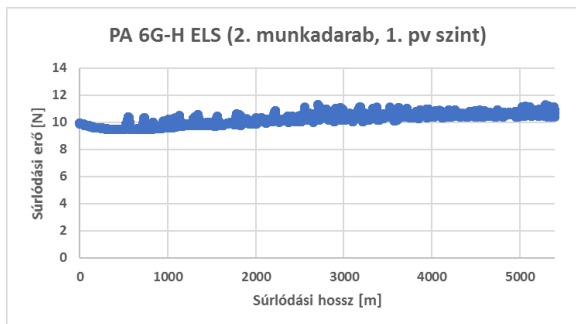
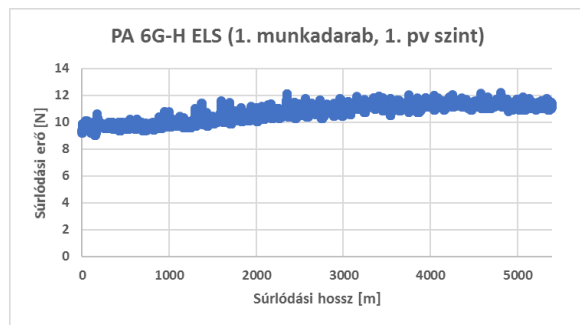
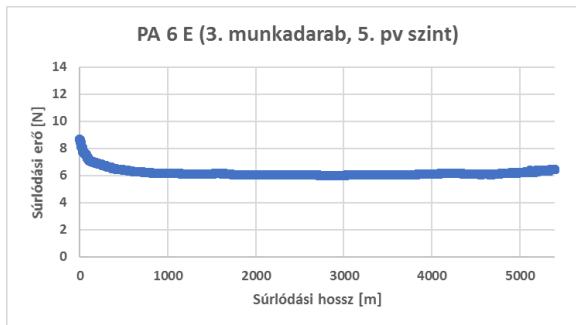
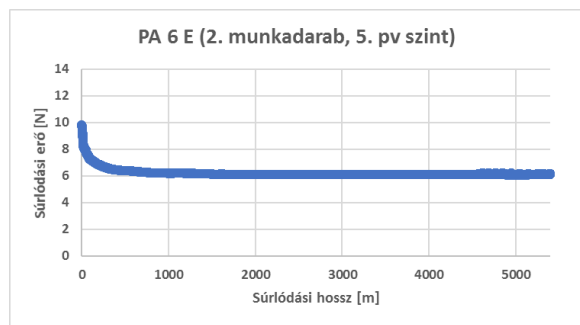
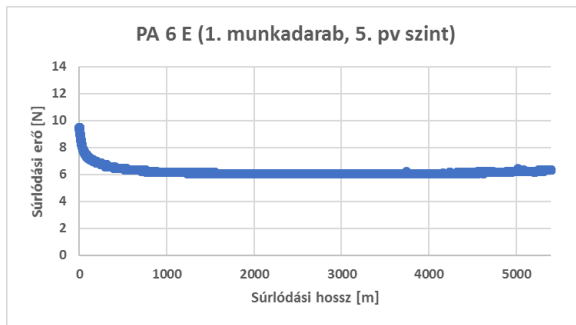
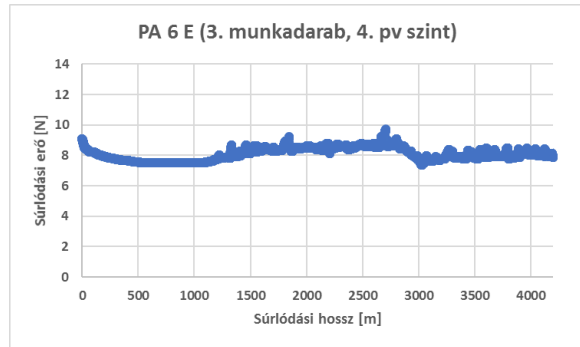
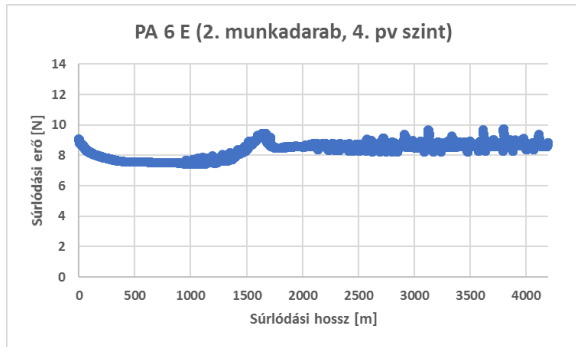
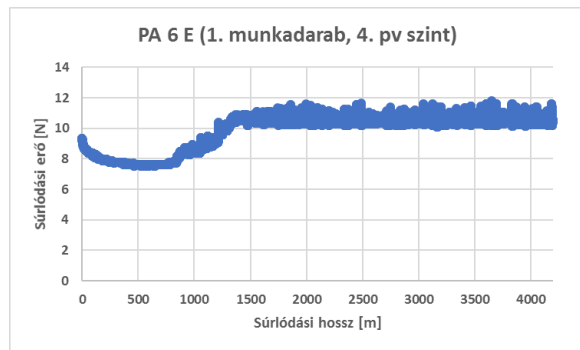
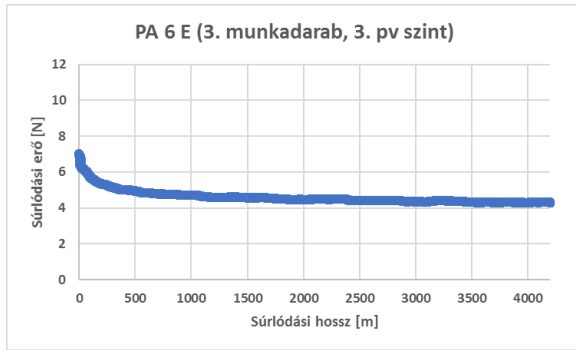
8. Mellékletek



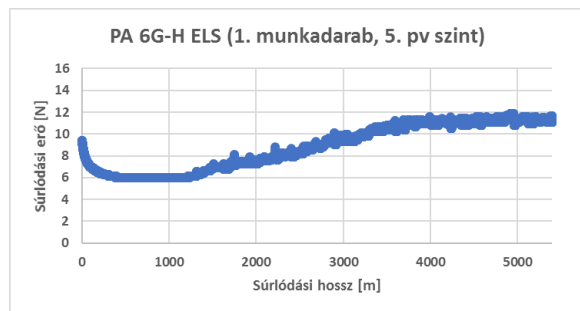
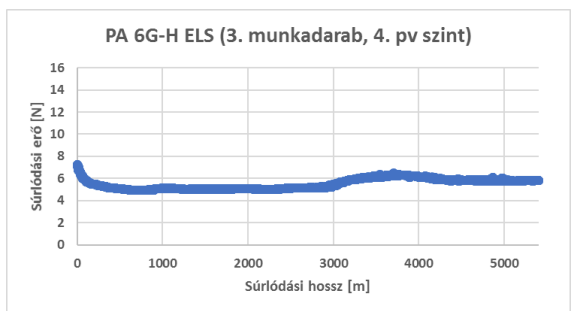
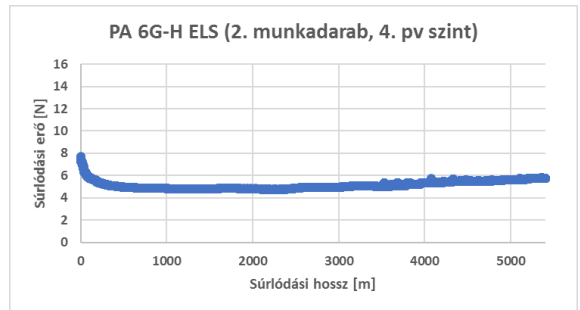
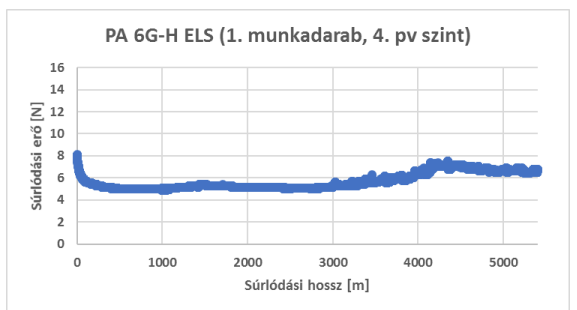
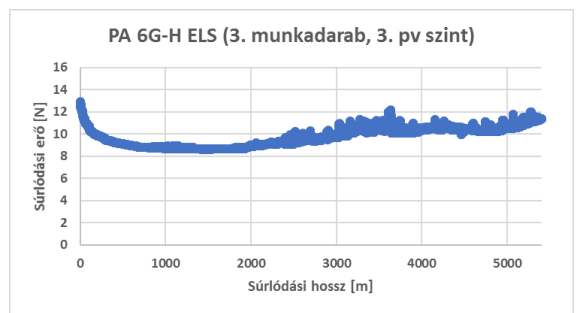
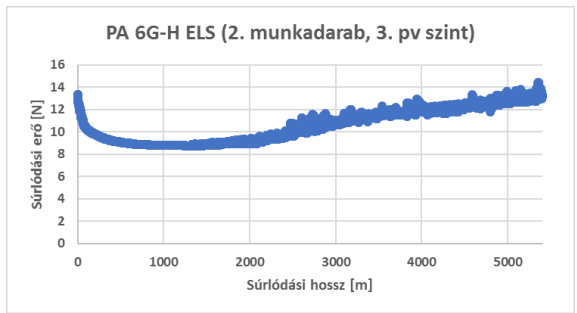
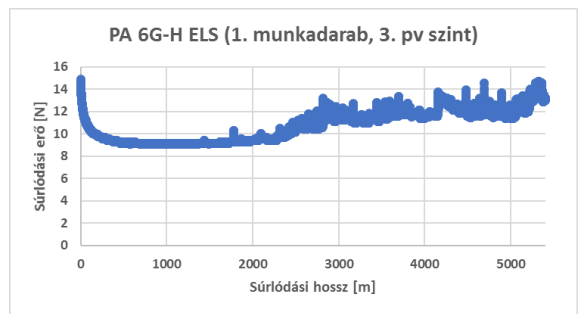
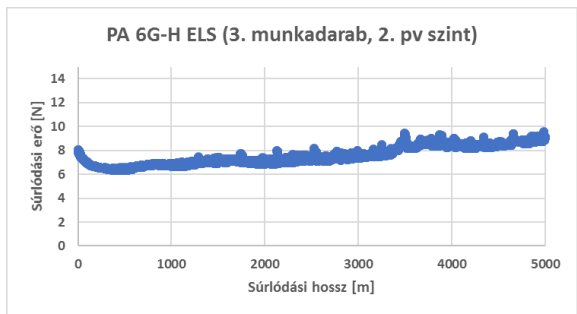
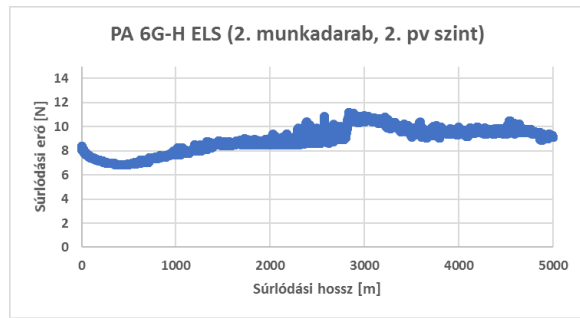
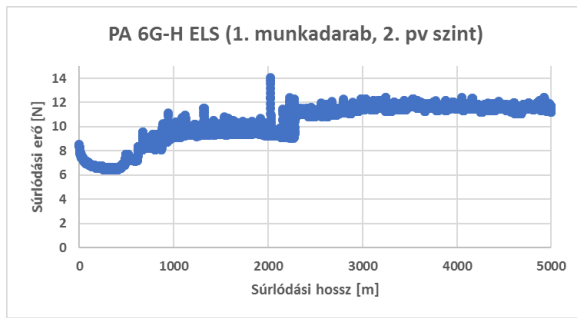
M9: Súrlódási erő diagramok



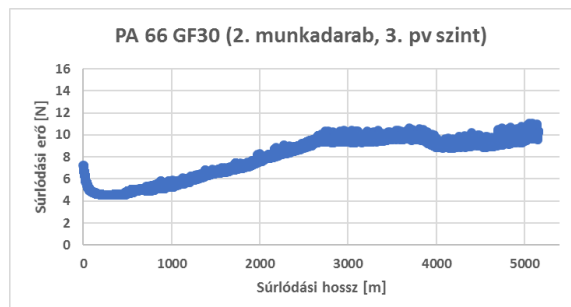
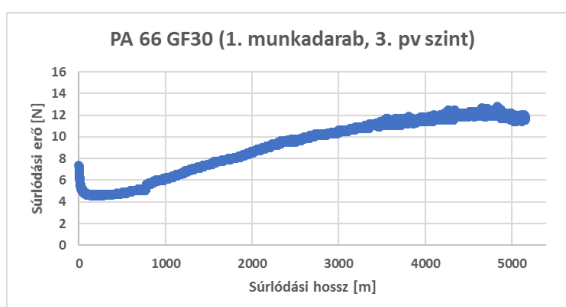
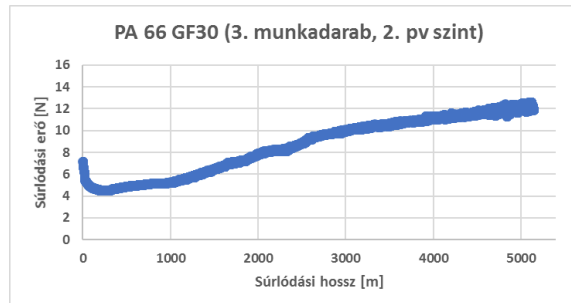
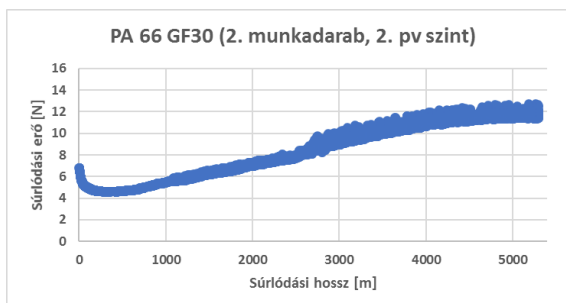
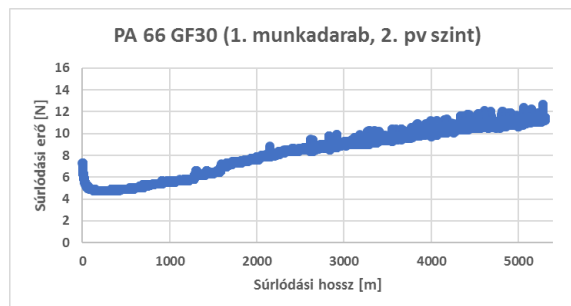
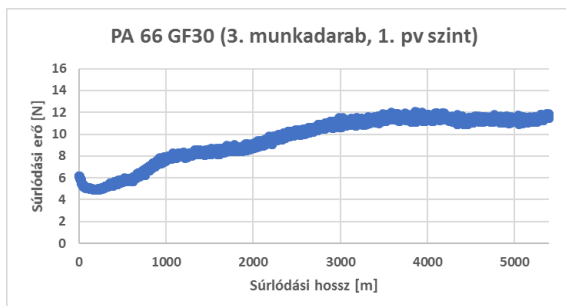
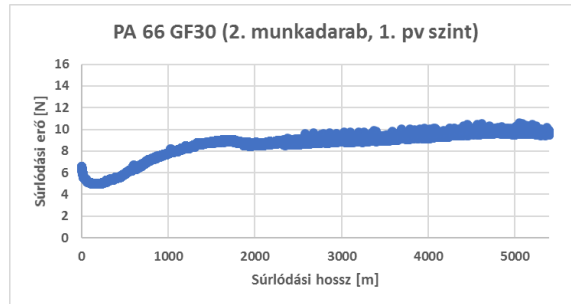
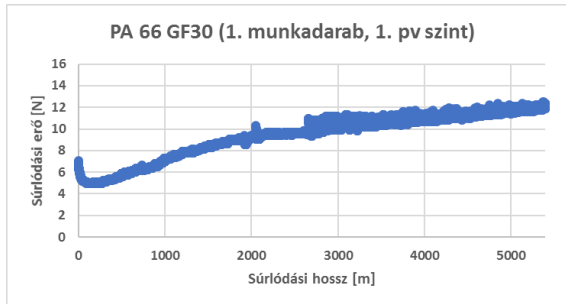
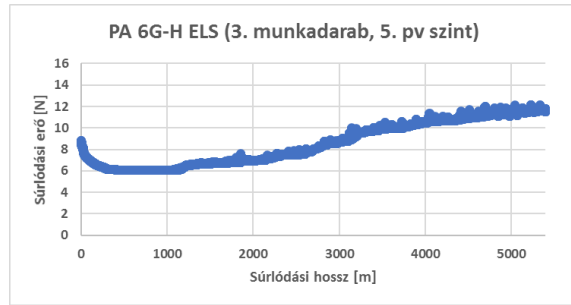
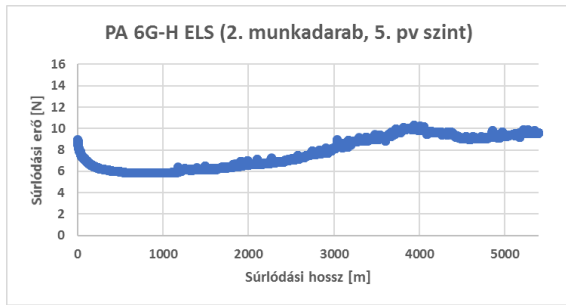
8. Mellékletek

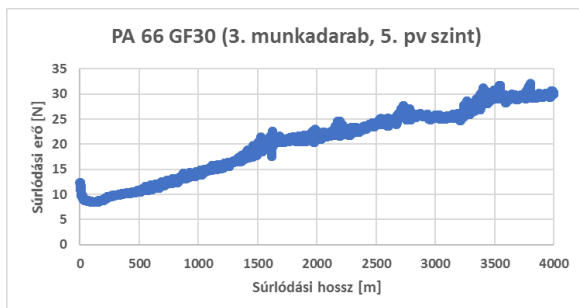
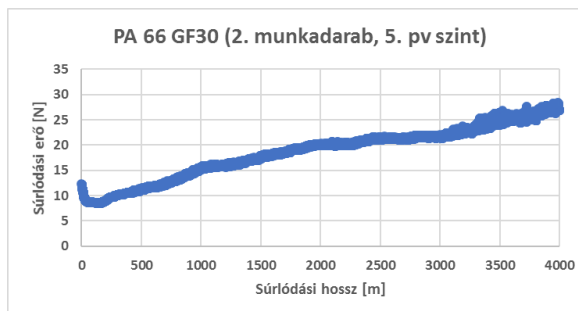
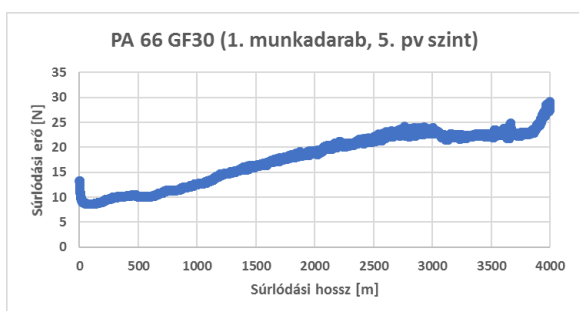
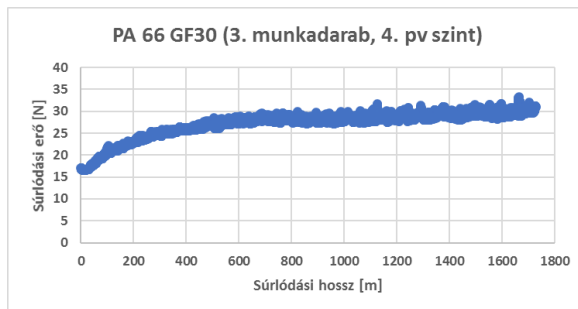
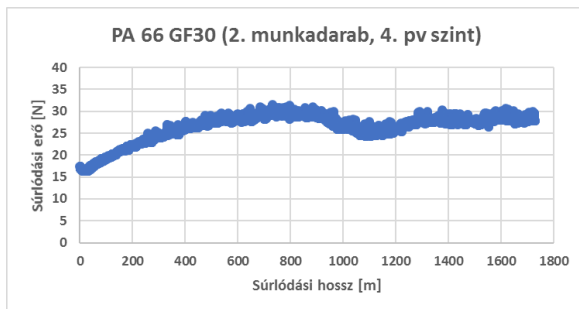
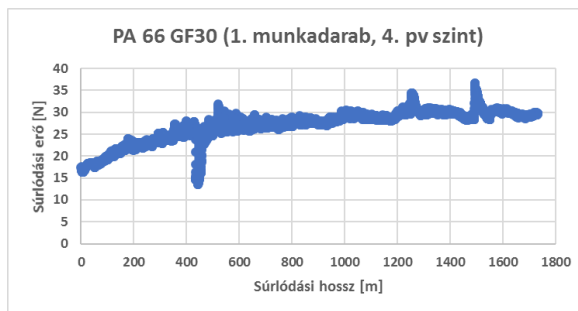
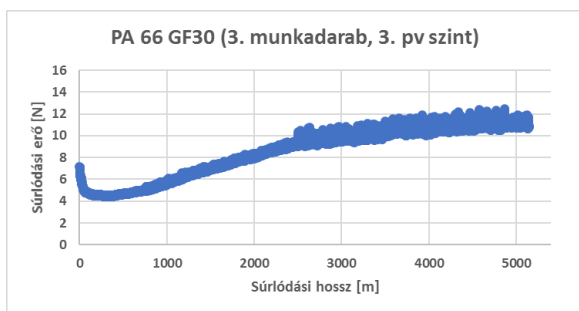


8. Mellékletek



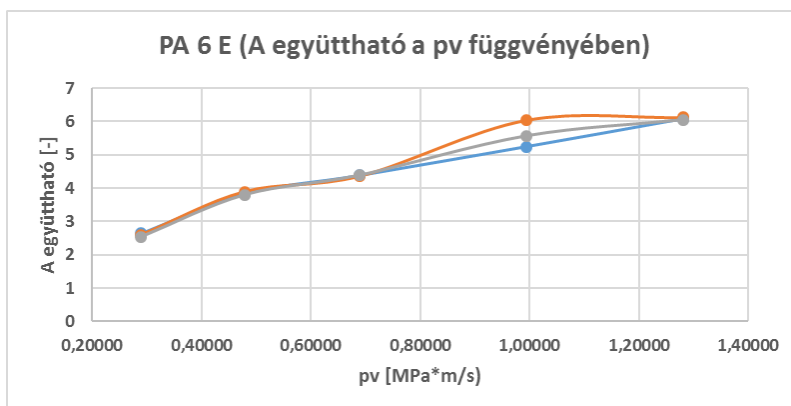
8. Mellékletek



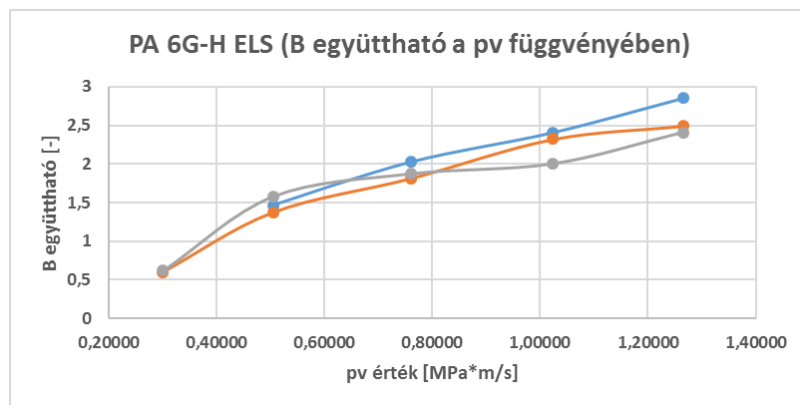
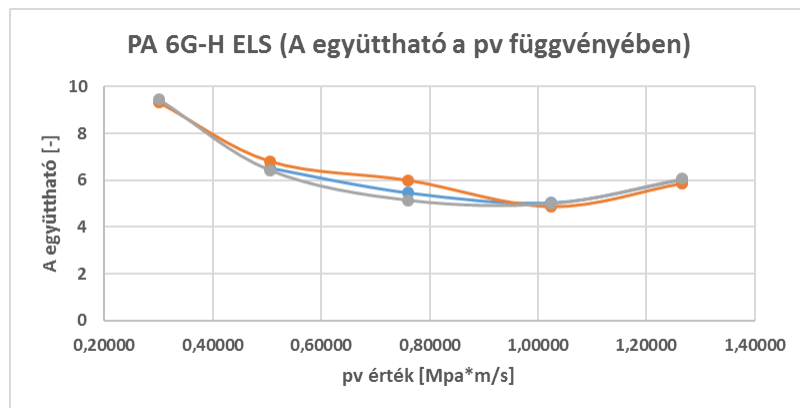
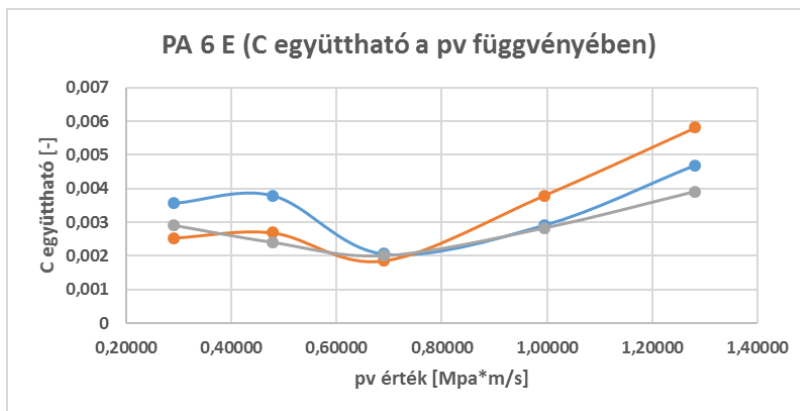
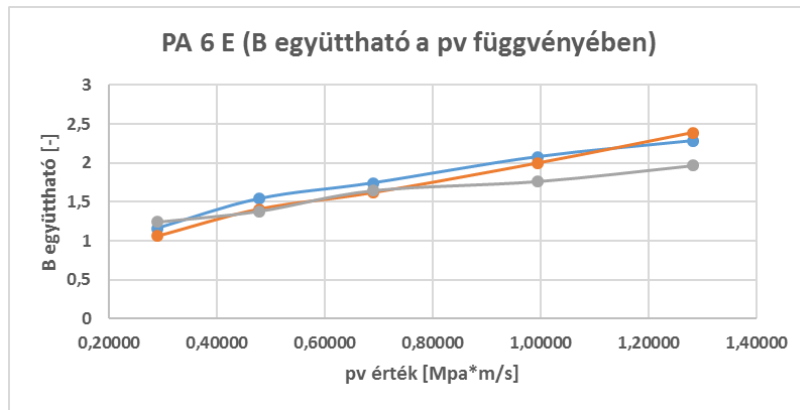


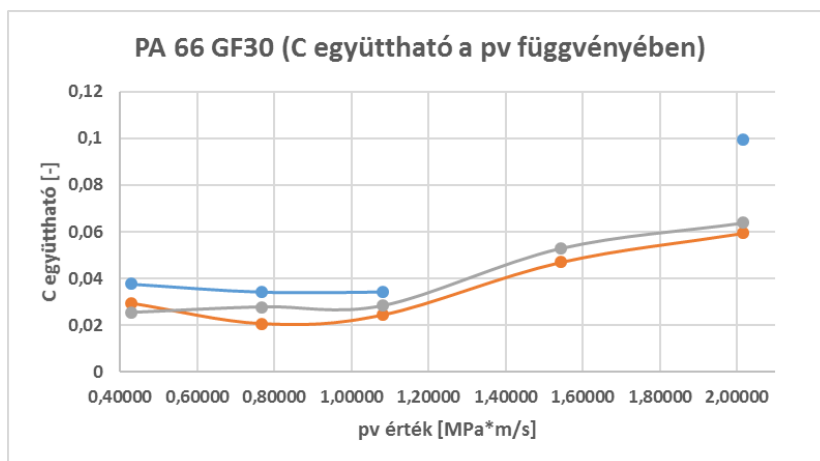
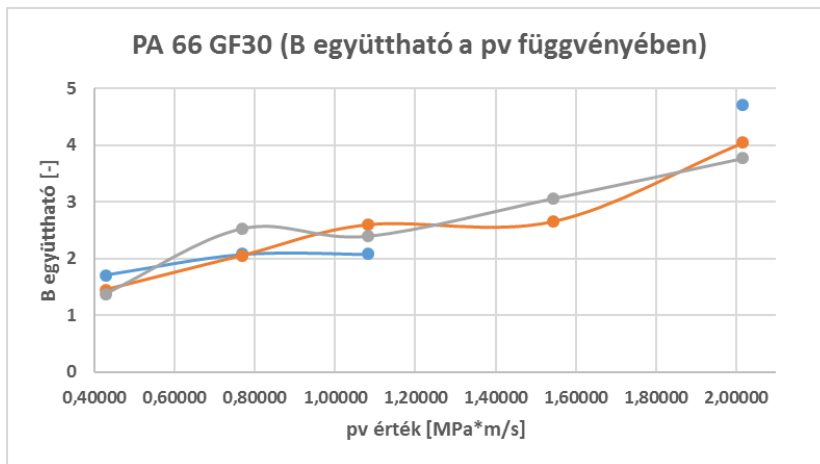
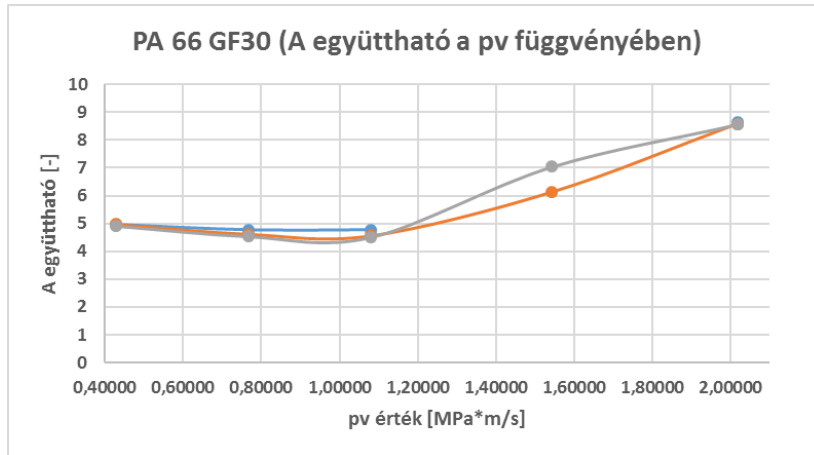
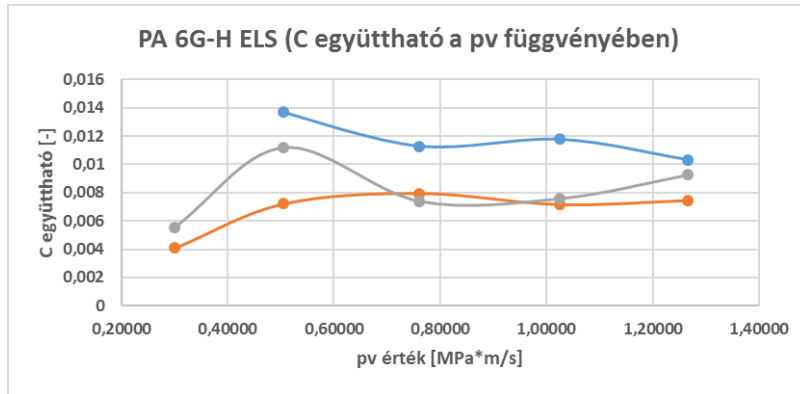
M10: Együtthatók ábrázolása a pv függvényében

Az alábbi diagramok a súrlódási függvény együtthatóit mutatják a pv függvényében.



8. Mellékletek





9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Kalácska Gábor professzor Úrnak és Dr. Keresztes Róbert docens Úrnak, hogy lehetőséget adtak disszertációm elkészítésére, valamint hasznos tanácsaikkal irányították kutatómunkámat.

Köszönöm Homolya György címzetes egyetemi docens Úrnak, hogy időt, energiát és eszközt biztosított méréseim egy részéhez.

Köszönöm édesanyámnak, mert emléke kitartást adott a legnehezebb időszakokban.

Gödöllő, 2022. 06. 28